МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

Ю. И. КОЗЮРЕНКО

ИСКУССТВЕННАЯ РЕВЕРБЕРАЦИЯ



МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 729

Ю. И. КОЗЮРЕНКО

ИСКУССТВЕННАЯ РЕВЕРБЕРАЦИЯ



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1970

6Ф2.7
К 59
УДК 534.843 242.6

Козюренко Ю. И.

К 59 Искусственная реверберация. М., «Энергия», 1970.

80 стр., с илл. (Массовая радиобиблиотека, вып. 729)

Описаны принципы получения искусственной реверберации различными способами и используемая при этом аппаратура отечественного и зарубежного производства. Даны практические советы по изготовлению несложных устройств, позволяющих получить эффект реверберации.

Книга рассчитана на радиолюбителей, интересующихся электроакустикой.

3-4-5 / 317-69 — 6Ф2.7

Козюренко Юрий Иванович

Искусственная реверберация

Редактор Г. И. Томас

Обложка художника А. А. Иванова

Технический редактор Л. М. Кузнецова

Корректор Н. В. Лобанова

Сдано в набор 4/VIII 1969 г. Подписано к печати 6/I 1970 г. Т-00107
Формат 84×108 1/32 Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 4,2 Уч.-изд. л. 5,6
Тираж 30.000 экз. Цена 23 коп. Зак. 5949

Издательство «Энергия». Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

г. Владимир, типография имени 50-летия Октября.

ВВЕДЕНИЕ

При возбуждении звуковых колебаний в воздухе образуются чередующиеся слои сжатия и разрежения частиц среды, распространяющиеся от источника звука в виде звуковых волн.

Скорость распространения звуковых волн принято называть *скоростью звука*. Скорость звука в основном зависит от температуры воздуха

$$c = 331 \sqrt{\frac{T}{273}}\ ,\ м/сек,$$

где T — температура воздуха по шкале Кельвина.

В технических расчетах принимают

$$c = 340\ м/сек \text{ при } T = 290°\ К\ (17°\ С).$$

Длина звуковой волны

$$\lambda = \frac{c}{f}\ ,\ м,$$

где f — частота колебаний.

Для крайних звуковых частот, воспринимаемых человеком, длина волны составляет

для частоты 16 *гц* $\lambda = \frac{340}{16} = 21{,}4\ м$;

для частоты 20 000 *гц* $\lambda = \frac{340}{20\,000} = 0{,}017 = 1{,}7\ см.$

Звуковые волны, встречая на своем пути препятствия, изменяют направление распространения. В том случае, когда размеры препятствия меньше, чем половина длины волны, звуковые волны обогнут это препятствие. Это явление огибания препятствий называется *дифракцией*. Особенно заметно это явление на нижних частотах, имеющих сравнительно большую длину волны.

Если в помещении в результате отражения звуковых волн от препятствий происходит сложение отраженной звуковой волны и падающей, то может происходить усиление или ослабление результирующего колебания. Такое усиление или ослабление колебаний одинаковой частоты называется *интерференцией*.

При взаимодействии колебаний с одинаковыми фазами амплитуда колебаний и громкость звука увеличиваются, а при сложении колебаний с противоположными фазами — уменьшаются.

Дифракция и интерференция — важнейшие явления при распространении звука в помещении.

Колебательное движение частиц среды при распространении звуковой волны является механическим колебанием около некоторого среднего положения. В чередующихся слоях сжатия и разрежения среды происходит изменение давления по сравнению с атмосферным. Разность между атмосферным давлением и давлением в данной точке звукового поля называется *звуковым давлением* p. Звуковое давление измеряется в ньютонах на 1 $м^2$. В момент сжатия звуковое давление положительно, в момент разрежения — отрицательно.

Источники звука (оркестр, голос человека и пр.) создают при самых громких звуках звуковое давление в десятки тысяч раз меньше атмосферного давления.

Предельно тихий звук, слышимый человеком, характеризуется минимальным значением звукового давления и называется *порогом слышимости.*

Звуковое давление, превышение которого вызывает болевое ощущение, называется *болевым порогом.*

Порог слышимости и болевой порог зависят от частоты звуковых колебаний. На частоте 1 000 *гц* порогу слышимости соответствует звуковое давление

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5}\ н/м^2,$$

а болевому порогу

$$p = 20\ н/м^2.$$

Звуковой мощностью P называется энергия, переносимая звуковой волной в единицу времени в направлении ее распространения. Звуковая мощность измеряется в ваттах.

Под звуковой энергией понимается механическая энергия, которая складывается из кинетической энергии движения частиц воздуха и потенциальной энергии сжатия этих частиц.

Интенсивность или сила звука (I) — это поток звуковой энергии, проходящей в единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярной к направлению распространения звуковой волны.

Интенсивность звука пропорциональна квадрату звукового давления и измеряется в ваттах на 1 $м^2$.

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c}\ ,\quad вт/м^2,$$

где ρ_0 — плотность воздуха ($\rho_0 = 1{,}23\ кг/м^3$).

При распространении звуковых волн интенсивность звука убывает пропорционально квадрату расстояния от источника звука.

В тех случаях, когда направление распространения звуковых волн определить сложно, используют другую энергетическую характеристику звукового поля — *плотность звуковой энергии* (E), т. е. энергию, содержащуюся в единице объема звукового поля. Плотность звуковой энергии связана с интенсивностью звуковой энергии простой зависимостью

$$E = \frac{I}{c}\ .$$

Измеряется плотность звуковой энергии в джоулях на 1 $м^3$.

Слуховое восприятие человека таит в себе достаточно много интересных особенностей. Одна из этих особенностей заключается в возможности на слух определять местоположение источника звука в пространстве. Это объясняется тем, что в общем случае звуковые колебания, воздействующие на правое и левое ухо, имеют некоторый сдвиг по фазе из-за разницы проходимого пути. Кроме этого, вследствие экранирующего действия головы и вызванных этим дифракционных явлений уровни сигналов, воспринимаемых тем и другим ухом, различны. Для низких частот существенное значение имеет различие фаз звуковых колебаний, для высоких — разница в уровнях.

Способность определять местоположение источника звука называется *бинауральным эффектом.*

При слушании одним ухом нарушается не только способность к локализации источника звука, но ухудшается восприятие звуковой программы в целом. Такой вид прослушивания называется моноуральным, что соответствует приему программы одним монофоническим микрофоном и прослушиванию через один громкоговоритель.

Не следует смешивать бинауральный эффект и стереоэффект. *Стереоэффект* обусловлен бинауральным восприятием двух или более раздельных источников звука с сохранением акустической перспективы.

Другая особенность нашего слуха — его *инерционность.* Если какой-либо источник звука выключить на 0,04—0,05 *сек,* а затем снова включить, то слух не обнаружит паузы. Это свойство слуха как бы увеличивать протяженность звука на 0,04—0,05 *сек* играет важную роль в оценке возможностей различных систем и аппаратов в создании эффектов искусственной реверберации и эхо, а также в оценке акустических свойств помещений.

Наш слух обладает еще одной существенной особенностью, заключающейся в том, что изменение интенсивности звука воспринимается пропорционально не самому изменению интенсивности звука, а логарифму этого изменения, поэтому в электроакустике принято оценивать звуковое давление и интенсивность звука в относительных логарифмических единицах — децибелах (1 бел = 10 децибел). Измеряемые таким образом величины называются *уровнями.*

Уровень звукового давления подсчитывается по формуле

$$N = 10 \lg \left(\frac{p}{p_0}\right)^2 = 20 \lg \frac{p}{p_0}, \ \partial б,$$

где p — измеренное звуковое давление;

p_0 — звуковое давление на пороге слышимости.

Уровень интенсивности звука

$$N = 10 \lg \frac{I}{I_0}, \ \partial б,$$

где I — измеренная интенсивность звука;

I_0 — интенсивность звука на пороге слышимости.

В табл. 1 приведены значения звуковых давлений, силы звука и соответствующие этому уровни в децибелах для некоторых источников звука.

Таблица 1

Источник звука	Звуковое давление p, $н/м^2$	Сила звука I, $вт/м^2$	Уровень N, $дб$	Примечание
Шум самолета на расстоянии 5 *м*	2×10^2	10^2	140	—
Котельный цех	2×10	10^0	120	Болевой порог
Большой оркестр фортиссимо Шум поезда метро	2,0	10^{-2}	100	—
Громкая радиомузыка Рояль Громкая речь сценическая	2×10^{-1}	10^{-4}	80	—
Шумная улица Разговор в жилой комнате Перелистывание газеты	2×10^{-2}	2×10^{-6}	60	—
Пианиссимо музыкального исполнения Скрипка тихо Тихая улица, деревня Тикание часов на расстоянии 0,5 *м*	2×10^{-3}	10^{-8}	40	—
Шаги по ковру Тихий парк Шепот на расстоянии 1 *м*	2×10^{-4}	10^{-10}	20	—
Шорох листьев на деревьях в тихую погоду	$6,3 \times 10^{-5}$	10^{-11}	10	—
«Писк» комара	2×10^{-5}	10^{-12}	0	Порог слышимости

Часто впадают в ошибку, путая понятие силы звука и громкости звука. *Громкость звука* — субъективная оценка силы звука, зависящая от частоты звукового сигнала и от условий его воспроизведения.

За уровень громкости некоторого звука принимают уровень силы звука с частотой 1 000 *гц*, равно громкого с заданным звуком.

Уровень громкости выражается в фонах. На частоте 1 000 *гц* уровень громкости в фонах совпадает с уровнем силы звука в децибелах. Для получения одинакового уровня громкости по всему звуковому диапазону сила звука на низших и высших частотах должна быть больше, чем на частоте 1 000 *гц*.

Логарифмические единицы (децибелы) применяются и для оценки уровней электрических сигналов в каналах звукопередачи. Изменение электрического уровня в децибелах может быть выражено через напряжение, ток и мощность. Для этого отмеченный уровень электрического сигнала сравнивается с так называемым нулевым уровнем напряжения, тока и мощности. За нулевой уровень мощности принимается мощность в 1 *мвт*, выделяющаяся на сопротивлении в 600 *ом*. Этому соответствуют значения напряжения $U=0{,}775$ *в* и тока $I=1{,}29$ *ма*.

Чаще всего электрические уровни выражают через отношения напряжений

$$N = 20 \lg \frac{U_2}{U_1}, \ \partial б,$$

где U_1 — первоначальное напряжение;

U_2 — напряжение после изменения.

При распространении звука в закрытом помещении звуковые волны, встречая на своем пути препятствие, частично поглощаются этим препятствием, а частично от него отражаются. Для оценки поглощающей и отражающей способности различных материалов вводятся понятия коэффициента звукопоглощения α и коэффициента отражения β.

Коэффициентом звукопоглощения называется отношение поглощенной энергии $E_{\text{полг}}$ к падающей $E_{\text{пад}}$

$$\alpha = \frac{E_{\text{погл}}}{E_{\text{пад}}}.$$

Коэффициентом отражения называется отношение отраженной энергии $E_{\text{отр}}$ к падающей

$$\beta = \frac{E_{\text{отр}}}{E_{\text{пад}}}.$$

Сумма поглощенной и отраженной энергии равна падающей энергии, поэтому $\alpha+\beta=1$. Поглощение измеряется в сэбинах (*сэб*). За единицу поглощения 1 *сэб* принято поглощение поверхности открытого окна площадью в 1 $м^2$.

Глава первая

ЕСТЕСТВЕННАЯ РЕВЕРБЕРАЦИЯ

ПОНЯТИЕ РЕВЕРБЕРАЦИИ

В любом закрытом помещении (в театре, концертном зале и др.) звук доходит до слушателя не только от источника звука, но также и после многократных отражений от поверхностей, ограничивающих помещение. Звук, идущий непосредственно от источника, называется прямым и доходит до слушателя первым.

Понятие «отраженный звук» объединяет все остальные звуки, претерпевающие до прихода к слушателю одно или несколько отражений.

Поскольку путь, пройденный отраженным звуком, всегда больше пути, пройденного прямым звуком, отраженный звук всегда приходит к слушателю позже прямого звука.

На открытом воздухе звук может отражаться от различных препятствий (здания, лес, горы и пр.). Может случиться, что задержка отраженного звука относительно момента прихода к слушателю прямого звука может составлять несколько секунд. Если громкость отраженного звука сравнима с громкостью звука, возбужденного источником, то слышно эхо. При этом задержка отраженного звука должна быть не менее 0,05 *сек*.

С давних пор эхо привлекало людей. На земле существует достаточно много мест, где это явление особенно поразительно.

Б. Перельман в своей книге «Занимательная физика» приводит несколько примеров. В замке Вудсток, в Англии, эхо отчетливо повторяет 17 слогов, это значит, время задержки настолько большое, что можно произнести 17 слогов, прежде чем эхо первого слога вернется обратно. В замке близ Милана (Италия) выстрел, произведенный из окна флигеля, повторялся эхом 40—50 раз, а громко сказанное слово — 30 раз!

Очевидно, звукопоглощение стен замка было крайне малым. Явление эха можно часто наблюдать на опушке леса — в этом случае звук отражается от деревьев.

В горах эхо встречается чаще, чем на равнинах. Чем резче, отрывистее звук, тем эхо отчетливее. Интересно отметить, что высокие голоса женщин и детей дают более отчетливое эхо, чем низкие мужские.

В закрытых помещениях эхо возникает весьма редко. Его можно услышать в залах с куполами или цилиндрическими стенами, а также с какими-либо архитектурными деталями, фокусирующими отражённый звук. Но, как правило, в закрытом помещении отражение создает не один, а целую серию повторных звуков, приходящих к слушателю со всех сторон (рис. 1).

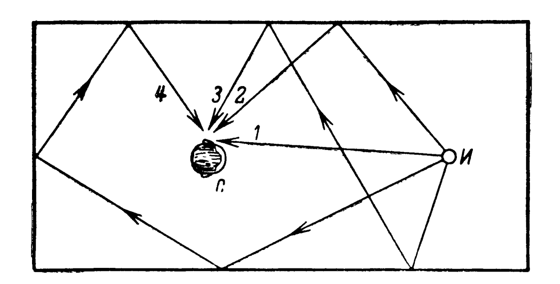


Рис. 1. Отражение звука от стен помещения. *И*—источник звука; *С*—слушатель; *1*—прямой звук; *2*—звук, претерпевший одно отражение; *3*—звук, претерпевший два отражения; *4*—звук, претерпевший три отражения.

Для пояснения понятия «реверберация» проделаем несложный опыт. Включим в исследуемом помещении источник звука. Сила звука при этом в помещении не достигнет определенного уровня мгновенно в момент возникновения звука. Его энергия будет возрастать после каждого нового отражения звуковой волны от внутренних поверхностей помещения до того момента, пока не наступит акустическое равновесие, при котором количество поглощаемой поверхностями и рассеиваемой в воздухе звуковой энергии не станет равным количеству излучаемой энергии.

После первых отражений в помещении образуется звуковое поле, интенсивность которого в каждой точке зависит от формы помещения, материала поверхностей, количества и расположения внутреннего оборудования, а также от числа людей, находящихся в помещении. В зале с хорошей акустикой интенсивность звука в любой точке помещения почти одинакова, что бывает в случае, когда звуковое поле диффузно. Диффузность звукового поля определяется тем, насколько хорошо «смешаны» прямые и отраженные звуковые волны. В зале с хорошей акустикой слушатели, находящиеся в разных точках помещения, воспринимают звук одинаково хорошо. Характерной особенностью диффузного поля является большое количество отражений, при этом общая энергия звукового поля в помещении не изменяется.

Если выключить источник звуковой энергии, который до этого времени работал в исследуемом помещении, постепенно замирающий звук будет слышен до тех пор, пока его сила не достигнет слухового порога.

Это свободное затухание звуковой энергии в закрытом помещении и названо *реверберацией*.

Реверберация (от латинского слова reverberare — отражать) — остаточное звучание, сохраняющееся после выключения источника звука и обусловленное приходом в данную точку запоздавших, отраженных звуковых волн. Время, в течение которого интенсивность звука уменьшается до порога слышимости, называется *временем реверберации* или отзвука. На рис. 2 изображен график изменения интенсивности звука в помещении. Интенсивность нарастает с момента включения источника звука (t_0) до момента, когда в помещении наступает акустическое равновесие (t_1). В некоторый момент t_2 источник звука выключают (как говорят, производится «отсечка» звука). Интенсивность звука в помещении постепенно уменьшается и в момент t_3 достигает порога слышимости. Разность $t_3—t_2$ называется временем реверберации.

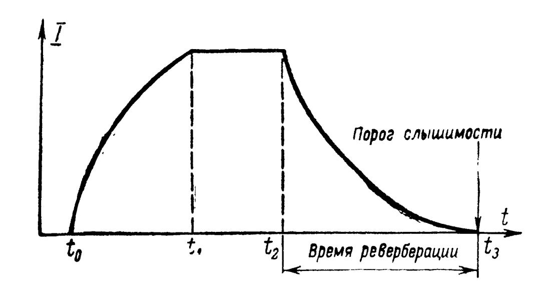


Рис. 2. График изменения интенсивности звука в помещении.

Затухание звука в диффузном поле происходит плавно, потому что число отражений очень велико, а разница уровней отдельных отражений незначительна. Если провести аналогию со светом, то можно сказать, что подобно тому, как рассеянный свет создает в помещении равномерную освещенность, так и рассеянная звуковая энергия обеспечивает равномерное распределение звука и этим создает лучшие условия слышимости.

Очевидно, что время реверберации зависит от количества отражений звуковых волн в 1 *сек* и от количества звуковой энергии, поглощаемой при каждом отражении. Если в помещении много звукопоглотителей (мягкая мебель, драпировки, ковры и т. д.), то звук затухает очень быстро. В таких случаях говорят: зал «сухой» — время реверберации у него мало́. Сам слушатель также поглощает звуковую энергию, поэтому при расчете времени реверберации в зрительных залах обязательно учитывается количество присутствующих.

Если стены зала покрыты материалом с малым α, то звук затухает значительно дольше, так как поглощение звуковой энергии при каждом отражении меньше. У такого зала время реверберации большое. Слишком большое время реверберации может явиться одним из самых главных акустических недостатков помещения. Ярким примером этого может служить лекционный зал, построенный в Лос-Анжелесе (США). Громкий возглас в этом зале остается слышным 25 *сек!* Конечно, проводить в нем какую-либо лекцию или беседу было невозможно, слова наплывали одно на другое, образуя

невообразимую мешанину звуков. Пришлось использовать этот зал как читальный. Поэтому очень важно уметь рассчитать время реверберации. Пусть, например, после выключения звука в помещении последовательные отражения происходят 20 раз в 1 *сек.* Считаем, что первоначальный звук в помещении при акустическом равновесии обладает интенсивностью в 1 000 000 *ед.* интенсивности, т. е. в 10^6 раз выше порога слышимости, и что при каждом отражении поглощается 10% падающей звуковой энергии. Тогда после первого отражения в помещении останется 90% первоначальной звуковой энергии. После второго отражения останется $0{,}9 \times 0{,}9 = 0{,}9^2$, после третьего отражения — $0{,}9^3$ и т. д. Сила звука достигнет уровня слухового порога после n последовательных отражений, т. е. когда $0{,}9^n$ станет равным 0,000001, откуда число отражений $n = 130$. Поскольку в каждую секунду в помещении происходит 20 последовательных отражений, время, необходимое для того, чтобы звук замер в данном помещении до порога слышимости, равно $130/20 = 6{,}5$ *сек.* Это и есть время реверберации данного помещения. Полагая, что то же помещение будет заглушено материалом, отражающим 50% падающей звуковой энергии, можно рассчитать, что в этом случае время реверберации равно приблизительно 1 *сек.*

СТАНДАРТНОЕ ВРЕМЯ РЕВЕРБЕРАЦИИ

Время реверберации отсчитывается от момента отсечки звука и до порога слышимости, независимо от начальной громкости звука, поэтому процесс реверберации длится тем больше, чем громче первоначальный звук. Очевидно, что для практических целей введенное раньше понятие время реверберации или «отзвука» трудно использовать, поэтому его заменяют понятием «стандартное время реверберации». Это одна из главных характеристик акустических свойств помещения. Термин «стандартное время реверберации» определяет собой промежуток времени свободного затухания звуковой энергии в помещении, за который плотность звуковой энергии (интенсивность звука в помещении) уменьшится в миллион раз по сравнению с первоначальной величиной. Так как плотность звуковой энергии и интенсивность звука пропорциональны квадрату звукового давления в данной точке пространства, то звуковое давление за тот же промежуток времени уменьшится в тысячу раз по сравнению с первоначальным значением.

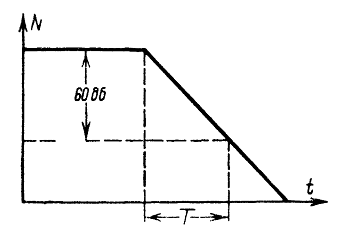


Рис. 3. Спадание уровня силы звука в помещении.

В общем случае этот момент может не совпадать с порогом слышимости. Так, если звук был очень сильным (на уровне болевого порога), то в момент, когда его сила уменьшится в миллион раз, он будет восприниматься вполне отчетливо. Для расчетов используют график процесса реверберации, подобный изображенному на рис. 3. Время стандартной реверберации соответствует интервалу *T*.

Для того чтобы определить насколько уменьшилась интенсивность звука (в децибелах), необходимо вычислить

$$10\lg\frac{I_1}{I_2},$$

где I_1 — первоначальное значение интенсивности;

I_2 — интенсивность после уменьшения.

В данном случае $I_1 = 10^6 I_2$, откуда

$$10\lg\frac{I}{I_2} = 10\lg\frac{10^6 I_2}{I_2} = 60\ \text{дб}.$$

Американский физик У. К. Сэбин в начале XX в. провел многочисленные исследования реверберационного процесса и установил основные закономерности этого явления. Так, им предложена формула, по которой можно подсчитать стандартное время реверберации помещения:

$$T = 0{,}164\frac{V}{A},\ \text{сек},$$

где V — объем помещения, $м^3$,

A — общее количество единиц поглощения, *сэб*, которое подсчитывается по формуле

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S + \ldots + \alpha_n S_n,$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \ldots \alpha_n$ —коэффициенты звукопоглощения поверхностей помещения;

S_1; S_2; S_3 ...S_n —площади соответствующих поверхностей, $м^2$.

Из формулы Сэбина следует, что время реверберации тем больше, чем больше объем помещения и чем меньше коэффициенты поглощения его поверхностей. Звукопоглощающая способность материалов меняется с изменением частоты, поэтому коэффициенты звукопоглощения измеряют на нескольких частотах: 125, 250, 500, 1 000, 2 000 и 4 000 *гц*. В табл. 2 приведены коэффициенты звукопоглощения некоторых материалов и конструкций.

ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВРЕМЕНИ РЕВЕРБЕРАЦИИ

Вторая важная характеристика акустических свойств помещения—зависимость времени реверберации от частоты, обусловленная различной степенью звукопоглощения акустических материалов на различных частотах. Вот пример такой зависимости для помещения с оштукатуренными стенами: на частоте 125 *гц* средний коэффициент поглощения помещения 0,06, при этом время реверберации будет 7,5 *сек*. На частоте 500 *гц* средний коэффициент поглощения 0,36 и время реверберации 1,25 *сек*, на частоте 2 000 *гц* средний коэффициент уже равен 0,52, при этом время реверберации всего 0,82 *сек*. В помещении с такой отделкой стен низкие звуки резко выделяются и «гудят», а высокие заглушаются. Акустика в таком помещении явно плохая.

Кроме материала покрытия стен, потолка и пола, на процесс затухания звука и время реверберации влияют вязкость и теплопроводность воздуха. Особенно это сказывается на звуковых коле-

Таблица 2

Материал	Коэффициенты звукопоглощения на частотах, *гц*					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Бетонная стена гладкая	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04
Кирпичная стена неоштукатуренная . . .	0,02	0,02	0,03	0,04	0,07	0,07
Штукатурка известковая	0,03	0,04	0,06	0,08	0,04	0,05
Плиты сухой штукатурки	0,02	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
Фанера	0,05	0,06	0,06	0,1	0,1	0,1
Стекло зеркальное . . .	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
Ткань бархатная . . .	0,05	0,12	0,35	0,45	0,38	0,36
Ткань хлопчатобумажная драпирующая . . .	0,12	0,31	0,52	0,68	0,60	0,57
Ковер	0,12	0,14	0,23	0,32	0,38	0,42
Волосяной войлок толщиной 2,5 *см* . . .	0,18	0,36	0,71	0,79	0,82	0,85
Минеральная вата толщиной 50 *см* . . .	0,17	0,59	0,99	0,95	0,96	0,87
Стеклянная вата толщиной 3 *см*.	0,1	0,15	0,45	0,55	0,6	0,6
Древесно-волокнистые плиты толщиной 12 *мм*	0,22	0,30	0,34	0,32	0,41	0,42
Акустические плиты ПАС толщиной 20 *мм* . .	0,05	0,21	0,66	0,91	0,91	0,79
Конструкция из перфорированной фанеры толщиной 4 *мм* с диаметром отверстия перфораций 5 *мм*, расстояния между отверстиями 35 *мм*	0,19	0,90	0,76	0,28	0,15	0,1
Стул с мягким сидением и спинкой	0,09	0,12	0,14	0,16	0,15	0,16

баниях с частотой выше 2 *кгц*. Коэффициент поглощения воздуха резко возрастает, а время реверберации на этих частотах соответственно уменьшается. Коэффициент звукопоглощения воздуха зависит также от его влажности и температуры: с увеличением температуры и влажности этот коэффициент уменьшается. Для частот выше 4 *кгц* коэффициент поглощения воздуха становится настолько большим, что регулирование времени реверберации за счет изменения общего поглощения ограничивающих поверхностей на частотах выше 4 *кгц* затруднено. Поэтому на практике время реверберации рассчитывается для частот ниже 4 *кгц*.

Оптимальная частотная характеристика реверберации зависит от назначения данного помещения. Так, например, в речевых студиях частотная характеристика времени реверберации должна быть горизонтальна и спадать в области низких частот (от 250 *гц*) на 20—30%. Это необходимо для того, чтобы повысить разборчивость речи, ослабив возникающие в помещениях малых объемов нежелательные резонансы, которые на слух воспринимаются как «бубнение» передачи. В студиях, предназначенных для исполнения эстрадных программ, реверберация на низких и высоких частотах должна быть уменьшена по сравнению со средними частотами. Это объясняется тем, что инструменты в эстрадных оркестрах создают высокие уровни звучания как в области самых низких, так и наиболее высоких частот.

ЗАТУХАНИЕ ЗВУКА В РЕАЛЬНОМ ПОМЕЩЕНИИ

Звуковые волны распространяются в помещении от источника во все стороны и, отражаясь от поверхностей благодаря интерференции, в некоторых направлениях могут усиливаться, причем такие колебания затухают медленнее в сравнении с другими колебаниями. Иными словами, в объеме воздуха, заключенном в данном помещении, возникают собственные колебания. В общем случае любой замкнутый объем воздуха может обладать бесконечным рядом собственных колебаний или «модусов» и спектр частот этих резонансных колебаний тем плотнее, чем больше размеры помещения.

Резонансные колебания искажают точность передачи, чрезмерно усиливая отдельные частоты и придавая процессу затухания специфические особенности. Неправильная форма самого помещения (ниши, выступы, балконы и пр.), поверхности, фиксирующие звук, а также неравномерное распределение поглощающего материала в помещениях—все это также нарушает плавное затухание звука.

Таким образом, реверберация на практике не является равномерным спаданием энергии звукового поля, а представляет собой затухание звуковой энергии, сосредоточенной в узких частотных полосах вблизи резонансных частот колебаний данного объема воздуха. Для резонансных частот это затухание неодинаково. Даже в том случае, когда первоначальное звуковое поле имело диффузный характер в момент выключения источника, реверберирующий звук немедленно начинает группироваться вокруг модусных частот, которые подчеркивают акустические дефекты помещения.

Для того чтобы приблизить процесс затухания к экспоненциальному и получить необходимое время реверберации, а также определенную частотную характеристику данного помещения, производят акустическую обработку и настройку этого помещения.

Интересно, что на Руси еще в X—XII вв. проводилась «акустическая обработка» внутренних стен церквей и храмов. Например, при постройке Софийского собора в Киеве для снижения гулкости (т. е. времени реверберации) на низких частотах применялись особые звукопоглощающие конструкции—«голосники», глиняные сосуды, вмазанные в стены. Звукопоглощение этих сосудов достаточно большое, поэтому звук, войдя через горловину, быстро затухал, благодаря чему уменьшалось общее отражение от стен и улучшалась разборчивость речи.

В XVIII в. при постройке театра в Останкинском дворце крепостные архитекторы Иван и Павел Аргуновы применили резонирующие деки под оркестром и под авансценой, а над зрительным залом установили особые короба, создававшие неизвестные в других театрах условия для звучания музыки.

Характерным акустическим дефектом помещения является «порхающее» эхо. Его можно отнести к разновидностям отраженных звуков. Простое эхо возникает, когда звук отражается от преграды и приходит к слушателю более чем через 50 *мсек* после прихода прямого звука. «Порхающее» эхо образуется обычно в тех помещениях, где две параллельные поверхности, расположенные на относительно малом расстоянии одна от другой, отражают звук, а остальные—поглощают. Звуковые волны, падающие на поглощающие стены, быстро затухают, а между другими параллельными стенами возникает «порхающее» эхо. Резкий отрывистый звук, например резкий удар в ладоши, возникший в некоторой точке помещения, будет слышен как последовательная серия концентрированных отражений звука, отделенных друг от друга временным интервалом менее 50 *мсек*. «Порхающее» эхо не воспринимается субъективно как эхо, но эти отражения перебивают равномерное спадание звуковой энергии и воспринимаются как дребезжание и щелкающие нарастания и спадания первоначального звука. При этом в дополнении к прямому звуку может возникнуть гудение в ритме отражений. Так, например, в зрительном зале театра им. Ленинского Комсомола в Ленинграде был обнаружен ряд акустических недостатков, в частности прослушивание «порхающего» эха в первых рядах партера. Как выяснилось, образование «порхающего» эха происходило из-за отражений звука от декоративного козырька под потолком при покашливании, ударах сиденьем о спинку стула, хлопках и пр.

Чтобы устранить возможное появление «порхающего» эха, параллельные стены помещения покрывают материалами с различными коэффициентами звукопоглощения, а, кроме того, стены располагают непараллельно и снабжают их для лучшего рассеивания звуковых волн выступами в виде конусов или сфер.

ОПТИМАЛЬНОЕ ВРЕМЯ РЕВЕРБЕРАЦИИ

Если послушать, как звучит речь или музыка в помещениях с различной реверберацией, то можно заметить, что помещение с большим количеством звукопоглощающего материала делает звук безжизненным. Малое время реверберации лишает передачу «воздуха» и требует от исполнителей повышенной громкости исполнения.

Наоборот, слишком большое время реверберации служит причиной «наплыва» одного слога на другой, что понижает разборчивость речи, при этом музыка превращается в дисгармоническую смесь звуков.

Наблюдающаяся при этом гулкость действует на слушателя угнетающе. Многочисленными опытами установлено, что существует некоторое наилучшее (оптимальное) время реверберации, при котором звучание той или иной музыки или речи кажется наиболее естественным.

Выбор оптимального времени реверберации для той или иной звуковой программы связан с назначением и специфическими особенностями помещения. Все помещения, используемые для воспроизведения речи и музыки, могут быть классифицированы по своему назначению.

Все помещения можно разделить на залы с естественными источниками звука (концертные залы, театры, аудитории) и с электроакустическими источниками (кинотеатры, залы с системой озвучения).

Залы можно разделить на предназначенные для музыкальных программ (концертный зал, опера) или для речевых и драматических выступлений (театры, аудитории).

Помещения, где проводится звукозапись, могут подразделяться на студии для записи речи (дикторские комнаты, ателье для дублирования и перезаписи фонограмм на киностудиях) и на студии для записи музыки различного характера, исполняемой различным составом исполнителей.

Правильный выбор времени реверберации для каждого помещения в соответствии с его назначением имеет большое практическое значение для улучшения качества звучания. При передаче речи, когда важно ясное разделение слогов, оптимальным является малое время реверберации. Так, для речевых студий и дикторских комнат оно составляет 0,4—0,5 *сек.* Для драматического театра, где важна разборчивость речи актера, оптимальное время приблизительно составляет 1 *сек.* Для оркестровых исполнений ритмической, танцевальной и джазовой музыки наименьшее время реверберации равно 0,7 *сек.*

В общем случае между оптимальным временем реверберации и музыкальным стилем существует определенная связь.

Многочисленными опытами установлено, что оптимальное время реверберации для современной симфонической музыки должно быть 1,48 *сек,* для классической—1,54 *сек*, а для музыки романтического стиля—2,07 *сек.*

По этой причине компромиссным решением для больших концертных залов является выбор оптимального времени от 1,5 до 2,5 *сек;* в области высоких и низких частот это время несколько уменьшается.

Примером помещения с идеальной акустикой может служить Колонный зал Дома Союзов (время реверберации 1,73 *сек*). В нем одинаково хорошо звучит голос оратора, певца, игра на рояле, оркестр. Объясняется это, очевидно, размерами самого зала и удачным расположением колонн и других архитектурных элементов зала. Большой зал Консерватории также относится к числу лучших концертных залов страны. Его время реверберации 2,3 *сек* сохраняется постоянным примерно до 1 500 *гц,* а затем несколько спадает.

На рис. 4 представлен график зависимости оптимального времени реверберации от объема помещения. Следует отметить, что отклонение реверберации на 10% от оптимальной величины практически мало заметно.

Оптимальное значение времени реверберации для двух помещений одинакового объема, из которых одно предназначено для передачи с микрофоном, а другое для непосредственного прослушивания, будет различным.

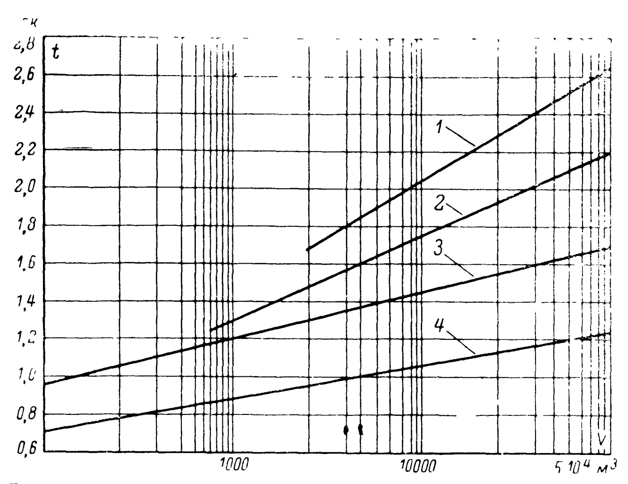


Рис. 4. Зависимость между оптимальным временем реверберации и объемом помещения.

1—хоровая и органная музыка; *2*—среднее значение для музыки; *3*—легкая музыка; *4*—звуковые фильмы.

Обычно считают, что для радиовещательных студий и студий звукозаписи оптимальное значение времени реверберации должно составлять 2/3 от той величины, которая является оптимальной для данного помещения в условиях бинаурального прослушивания.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ РЕВЕРБЕРАЦИИ В СТУДИЯХ

На практике часто возникает необходимость изменить в некоторых пределах время реверберации студии, так как обычно студия используется для разного рода исполнений, причем каждый род исполнения требует своего оптимума времени реверберации. В простейшем случае стены студии завешиваются матерчатыми драпировками, которые при необходимости можно раздвигать. Устройства коррекции частотной характеристики часто делают так, что поворотом или перемещением отдельных элементов можно менять частотную характеристику времени реверберации. Так, например, для приглушения музыкальных инструментов применяются передвижные звукопоглощающие щиты различных размеров. Огораживая этими щитами отдельные инструменты или группу инструментов, можно в небольших пределах влиять на частотную характеристику реверберации. Иногда на стенах студии устанавливают ящики со звукопоглощающими материалами внутри. Ящики снабжены поворачиваю-

щимися жалюзи; открывая и закрывая их, можно изменять в небольших пределах время реверберации студии. В одной из студий Венгерского радио на стенах размещены панели размерами 200×50 *см*, которые можно поворачивать на 180°, открывая или закрывая звукопоглотители, укрепленные на стенах. С помощью подобных панелей, но большего размера, установленных перпендикулярно стене, можно создать открытые спереди и звукопоглощающие внутри кабины, в которых могут быть размещены отдельные группы инструментов.

Наиболее сложная конструкция для изменения времени реверберации была в свое время установлена в одной из студий Государственного дома радиовещания и звукозаписи в Москве, где часть стен оборудована рядом поворотных колонн, снабженных на одной своей поверхности перфорацией. Время реверберации в студии становится наибольшим в том случае, если все поворотные колонны обращены перфорацией к стене. Регулирование времени реверберации достигается поворотом соответствующего числа колонн. Колонны вращаются электродвигателями, управляемыми дистанционно, что обеспечивает сравнительно гибкий способ акустической регулировки времени реверберации.

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ РЕВЕРБЕРАЦИИ

При исследовании акустики помещения наиболее важное место среди других электроакустических измерений занимает измерение времени реверберации. Существуют объективные и субъективные методы измерения.

В простейшем случае при субъективном измерении в помещении устанавливают громкоговоритель, на который от генератора подают сигнал 1 000 *гц* или музыкальную программу (желательно отрывок симфонической музыки) с уровнем 60 *дб*. Время, измеренное хронометром от момента выключения источника звука до момента практического исчезновения звука (на слух), и будет временем стандартной реверберации данного помещения.

Время реверберации можно измерить с достаточной точностью с помощью хронометра лишь при условии сравнительно большой продолжительности процесса реверберации и при многократном повторении измерения, с последующим усреднением полученных данных.

В группу методов объективного измерения входят измерения с помощью ряда специальных приборов. Наиболее простые приборы дают только количественную оценку реверберационного процесса, т. е. фиксируют время стандартной реверберации.

Однако, как указывалось выше, время реверберации, даже если оно измерено точно, еще не является достаточным критерием для суждения об акустических условиях помещения. В настоящее время используются приборы и установки, позволяющие судить не только о времени реверберации, но и дающие возможность исследовать весь процесс затухания звука. Для этого применяют автоматические самописцы уровней звуковой энергии.

Блок-схема такого устройства состоит из микрофона, предварительного усилителя, выпрямителя и логарифмического усилителя постоянного напряжения. Перемещение пера самописца пропорционально логарифму напряжения на выходе микрофона. Кривая реверберационного процесса записывается на специальной бумажной

ленте. Скорость ее протягивания можно регулировать в довольно широких пределах для выявления достаточного количества моментов, характеризующих процесс реверберации. По наклону кривой, являющейся усредненной характеристикой процесса затухания, определяют время реверберации.

Более сложная установка подобного типа включает в себя полосовые фильтры, устанавливаемые между микрофоном и самописцем уровней, при этом на бумаге вычерчивается ряд кривых, позволяющих провести частотный анализ реверберационного процесса.

Для исследования процесса затухания звуковой энергии и определения времени реверберации часто используют осциллограф с длительным послесвечением трубки. Это дает возможность получить количественную оценку реверберации, фотографируя осциллограмму процесса с применением специальной масштабной сетки.

Одним из существенных вопросов при исследовании реверберационного процесса является выбор источника звуковых колебаний, подаваемых на громкоговоритель измерительной установки. Для измерения времени реверберации используют различные звуковые сигналы: «воющий тон», белый шум, запись натуральных источников звука (оркестр), а также импульсные источники.

Глава вторая

АКУСТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К АППАРАТУРЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ

Искусственной реверберацией называется реверберация, вводимая в звуковую программу, передаваемую по электроакустическому тракту, причем эта реверберация создается не за счет влияния самой студии, а за счет искусственной задержки звука.

Потребность в применении искусственной реверберации в радиовещании возникла давно, в начале 30-х годов, когда в программе вещания появились радиопостановки.

В настоящее время искусственную реверберацию применяют:

1. В театре, телевидении, кино для создания различных эффектов реверберации и эха.
2. Для создания необходимых звуковых эффектов при записи и перезаписи музыки, шумов, речи.
3. В радиовещании при литературно-драматических передачах в случаях, когда нужно создать иллюзию переноса действия в различную акустическую обстановку (маленькая комната, большой зал, пещера и т. п.).
4. При студийных передачах и записях музыкальных программ, когда звукорежиссеру не удается с помощью одной только расстановки и регулировки микрофонов создать нужную гулкость и соотношение между гулкостью и четкостью звучания.
5. Для исправления дорогих и ценных в художественном отношении

записей, но сделанных в помещении с недостаточно большой реверберацией.

6. При монтаже концертов, состоящих из произведений, записанных в различной акустической обстановке.
7. При исследовании различных вопросов, связанных с естественным процессом затухания звука в закрытом помещении.
8. При игре на электромузыкальных инструментах.
9. При прослушивании музыкальных программ через радиоприемники, магнитофоны, проигрыватели.

К этому надо добавить, что искусственная реверберация связана с одним из весьма актуальных вопросов электроакустики—амбиофонией.

Перечисленные примеры, вероятно, не исчерпывают всех возможных случаев применения искусственной реверберации.

Качество и полнота решения всех этих вопросов зависят от того, насколько точно можно имитировать заданный процесс реверберации с помощью ревербератора.

Требования к установкам для получения искусственной реверберации можно свести к следующим:

возможность регулировки времени реверберации в сравнительно больших пределах, от долей секунды до 5—8 *сек;*

возможность регулировки частотной характеристики реверберации и формы кривой затухания звуковой энергии;

возможность применения установки для получения искусственной реверберации в одном из звеньев технологического процесса звукозаписи и звукопередачи;

возможность длительной работы устройства, простота обслуживания и надежность в работе.

Эти общие требования могут уточняться в зависимости от конкретного назначения устройства для получения искусственной реверберации.

В настоящее время известно достаточно много способов получения эффекта искусственной реверберации. Все эти способы можно условно разделить на три основных: акустический, электрический и электромеханический. Все эти методы имеют свои преимущества и недостатки, но по существу ни один из них не удовлетворяет полностью всем необходимым технологическим и художественным требованиям получения искусственной реверберации.

ЭХО-КАМЕРА

Самый ранний и широко распространенный до настоящего времени способ создания искусственной реверберации состоит в пропускании звуковой программы через гулкую камеру, так называемую «комнату эха»

Способ использования специального реверберирующего ателье для добавления к основному сигналу различных реверберационных эффектов был предложен проф. В. С. Казанским еще в 1929 г.

Наименование «комната эха» или «эхо-камера» — условное, так как затухание звуковой энергии в данном помещении происходит по экспоненциальному закону, типичному для реверберационного процесса.

Принцип использования эхо-камеры довольно прост: сигнал, принимаемый микрофоном M_1 в студии (рис. 5), усиливается мик-

рофонным усилителем $МУ_1$ и передается по основному каналу студийной передачи. Одновременно этот же сигнал, усиленный мощным усилителем *УМ*, воспроизводится одним или несколькими широкополосными громкоговорителями *Гр*, установленными в эхо-камере. Здесь же размещают один или несколько микрофонов M_2. Громкоговоритель устанавливают так, чтобы прямой звук не попадал на микрофон, который должен воспринимать преимущественно отраженные звуковые волны.

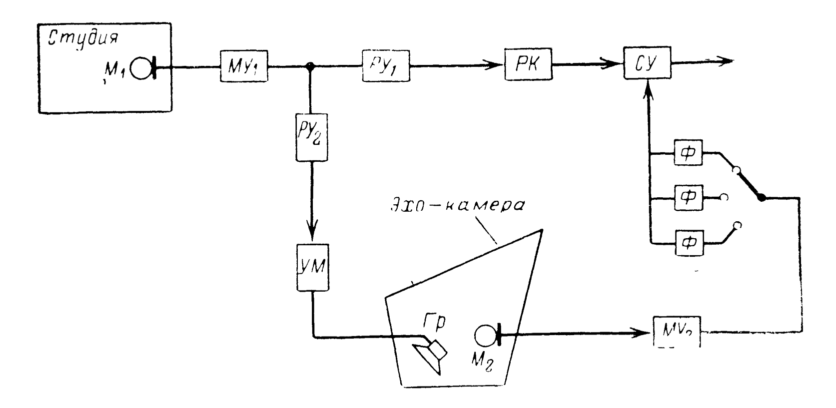


Рис. 5. Блок-схема включения «эхо-камеры» в тракт передачи.

После соответствующего усиления микрофонным усилителем $МУ_2$ реверберирующий сигнал подается через фильтр *Ф* в смеситель *СУ*, расположенный на пульте звукорежиссера. С помощью регуляторов $РУ_1$ и $РУ_2$, размещенных также на этом пульте, устанавливают определенный уровень подмешивания реверберирующего сигнала к сигналу, подаваемому по основному каналу.

Для предотвращения обратной связи в основном канале имеется разделительный каскад *РК* (как правило, катодный повторитель). С помощью фильтров *Ф*, пропускающих различные диапазоны звуковых частот, можно менять частотную характеристику искусственной реверберации.

Строго говоря, для эхо-камеры нельзя применить определение «искусственная реверберация», так как в действительности используется естественная реверберация специального акустически обработанного помещения. Это обстоятельство—естественный процесс реверберации — является главным преимуществом данного способа получения реверберации.

Для создания равномерного звукового поля реверберационное помещение не должно иметь поверхностей, концентрирующих звук, или ниш, способных резонировать лишь на нескольких частотах или в узкой полосе частот. Обычно камера имеет в плане форму неправильного многоугольника, т. е. стены расположены непараллельно друг другу, что обеспечивает большее количество беспорядочных многократных отражений звуковых волн. Того же эффекта можно достичь, расположив пол и потолок также непараллельно друг

другу (рис. 6). Иногда, кроме этого, к потолку камеры подвешивают гипсовые шары, как например, в эхо-камере Варшавского оперного театра.

Время и характер реверберационного процесса определяются размерами эхо-камеры и звукопоглощением ограничивающих ее поверхностей.

Эхо-камера, обеспечивающая хорошее качество звучания и длительное время реверберации, должна иметь достаточно большой объем — 150—250 $м^3$. На практике, однако, по экономическим соображениям используют камеры сравнительно небольшого объема, около 100 $м^3$ и даже несколько меньше. Так, при объеме камеры 50—60 $м^3$ время реверберации на частоте 1 000 *гц* составляет 4—5 *сек.*

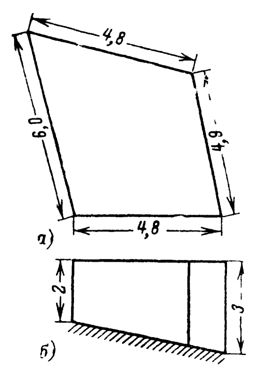


Рис. 6. План (*а*) и боковой вид (*б*) эхо-камеры (размеры в метрах).

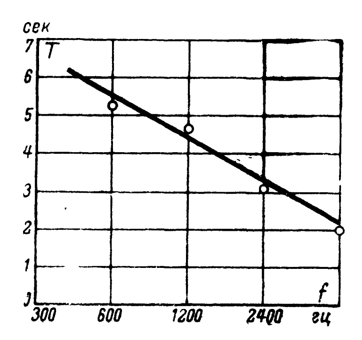


Рис. 7. Частотная характеристика времени реверберации эхо-камеры.

Частотная характеристика времени реверберации такой камеры представлена на рис. 7. Для компенсации спада частотной характеристики на высоких частотах в УНЧ, питающем громкоговоритель, предусмотрена коррекция в пределах до +16 *дб*. Уровень посторонних шумов в реверберационном помещении не должен превышать 20—25 *дб*, поэтому эхо-камеру изолируют особенно тщательно. Обычно камеру размещают отдельно от производственных помещений, например в подвалах зданий.

Требуемое большое время реверберации достигается за счет твердых, хорошо отражающих поверхностей с малым коэффициентом поглощения. Стены и потолок в комнате обычно делают бетонными или кирпичными, которые затем штукатурят или окрашивают эмалевой краской (без торцовки). Пол бетонируют или покрывают метлахской плиткой.

При настройке эхо-камеры время реверберации можно несколько регулировать путем изменения крутизны затухания звука. Это достигается за счет изменения расстояния между микрофоном и громкоговорителем или различной ориентировкой микрофона относительно отражающих поверхностей. Иногда применяют микрофоны с дистанционно изменяемой характеристикой направленности. Однако эти способы не дают возможности оперативно регулировать время ре-

верберации в процессе работы, что является основным недостатком эхо-камеры.

Степень гулкости передачи можно изменять по ходу действия лишь путем изменения относительного уровня подмешивания реверберирующего сигнала к прямому сигналу на пульте звукорежиссера. В реальных условиях звукопередачи этому соответствует эффект различного удаления исполнителя от микрофона (эффект акустической глубины).

Однако такая регулировка не всегда соответствует характеру передачи, поэтому в случае, когда необходимо иметь возможность менять время реверберации, устраивают несколько эхо-камер с различными объемами. В крупных радио- и телевизионных центрах обычно передачи ведутся одновременно из нескольких студий. Звукорежиссер, сообразуясь с художественными требованиями передачи или звукозаписи, подключает реверберационный канал к эхо-камере с необходимым временем реверберации. Так, например, в московском телецентре в Останкино оборудовано шесть камер; известная фирма грампластинок «Капитоль» (США) вынуждена была построить для звукозаписи пять камер; в Парижском радиодоме, введенном в эксплуатацию в 1964 г., имеется шесть камер с временем реверберации от 2,5 до 7 *сек.* В московском Доме радиовещания и звукозаписи используются две камеры.

Глава третья

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ

ПРИНЦИПЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАДЕРЖКИ ЭХО-СИГНАЛОВ В АППАРАТАХ МАГНИТНОЙ ЗАПИСИ

При электрическом способе получения искусственной реверберации применяются магнитные ревербераторы. Первый магнитный ревербератор был построен проф. В. С. Казанским в 1932 г. В этом ревербераторе запись производилась на кольцо стальной ленты, а считывание запаздывающих сигналов осуществлялось четырьмя головками воспроизведения. Несмотря на несовершенство этого устройства, эффект реверберации был хорошо заметен.

В настоящее время магнитные ревербераторы получили сравнительно широкое применение в радио- и телестудиях, в кино и театрах. Компактные и портативные ревербераторы этого типа применяются в концертах и на эстраде для создания эффектов искусственной реверберации и эха при выступлениях солистов, музыкальных ансамблей и при игре на электроинструментах. Поскольку эти ревербераторы сравнительно просты по конструкции, то их может собрать любой квалифицированный радиолюбитель и использовать при записи и перезаписи магнитных фонограмм, а также при проведении концертов и различных музыкальных вечеров.

Магнитные ревербераторы подразделяются на две группы по типу применяемого магнитоносителя: ревербератор с использовани-

ем петли магнитной ленты, при этом связь магнитных головок с лентой контактная; ревербератор с использованием постоянного магнитоносителя, в этом случае связь магнитных головок с магнитоносителем бесконтактная.

Принципиально эти ревербераторы не отличаются друг от друга. С точки зрения эксплуатации бесконтактная запись более экономична, так как срок службы носителя неограничен, но требования к механической части такого ревербератора очень высокие.

Принцип действия магнитного ревербератора заключается в следующем. Звуковой сигнал, записанный на кольцо движущегося звуконосителя, считывается несколькими головками воспроизведения. Положение головок обеспечивает некоторую задержку во времени, после этого суммарный реверберирующий сигнал со всех головок воспроизведения поступает через выходное устройство в линию.

Кроме того, сигнал с одной или нескольких головок воспроизведения после считывания и перезаписи через цепь обратной связи тоже поступает на выходное устройство. Сигналы, записанные таким образом на звуконосителе после прохождения последней головки воспроизведения, стираются; этот процесс перезаписи повторяется сколь угодно долгое время, ограниченное лишь уровнем шума канала запись—воспроизведение. Коэффициент усиления в тракте самого ревербератора делают равным единице. Величина выходного уровня реверберационного сигнала, подмешиваемого в канал прямого звука, регулируют специальным регулятором.

Качество магнитного ревербератора, как и всякого другого аппарата магнитной записи, зависит от частотной характеристики канала запись—воспроизведение, степени линейности системы, отношения сигнала к шуму и детонации, создаваемой механизмом, хотя в ревербераторе детонация заметна значительно слабее, чем в магнитофоне.

Применительно к магнитному ревербератору все эти величины и характеристики могут быть измерены и строго определены только для отдельных изолированных каналов ревербератора, в которых действуют одна головка записи, одна головка воспроизведения и отсутствует запаздывающая обратная связь.

В целом к магнитному ревербератору понятие неискаженной передачи не применимо.

Главной отличительной особенностью, по которой следует сравнивать между собой различные магнитные ревербераторы, является схема расположения и включения магнитных головок, от которых зависит возникающая в ревербераторе последовательность повторных сигналов. Характер этой последовательности и определяет качество искусственной реверберации.

Рассмотрим физические процессы, происходящие в магнитном ревербераторе без обратной связи (рис. 8). Входной сигнал, устанавливаемый с помощью регулятора уровня *РУ*, подается на усилитель записи *УЗ*, а с него на головку записи *ГЗ*. В цепь каждой воспроизводящей головки *ГВ* после усилителя воспроизведения *УВ* включено некоторое сопротивление (R_1—R_4), вызывающее затухание воспроизводимого сигнала. Величину затухания в цепи каждой головки выбирают такой, чтобы выходной уровень с последующей головки был меньше предыдущего на определенную величину. Таким образом, каждый n-й повторный сигнал, возникающий в ревербераторе под действием одного исходного сиг-

нала, характеризуется временем задержки τ_n затуханием A или коэффициентом затухания μ_n, равным отношению его амплитуды к амплитуде исходного сигнала. Стирание записи производится с помощью головки стирания *ГС* и вспомогательного генератора *ГВЧ*.

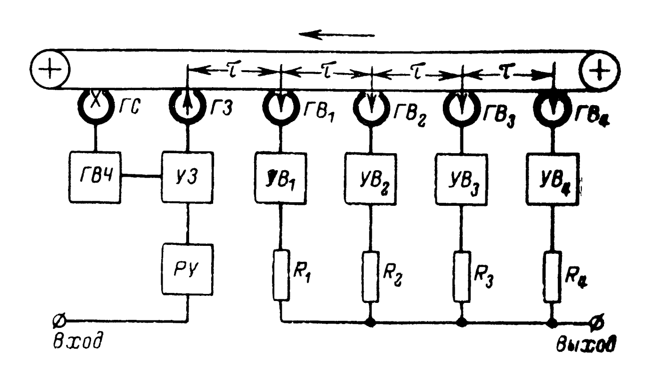


Рис. 8. Блок-схема магнитного ревербератора без обратной связи.

Если импульсная диаграмма (рис. 9) построена в логарифмическом масштабе, то амплитуды импульсов последовательных сигналов будут убывать вдоль прямой линии. Наклон этой линии зависит от затухания в цепи воспроизводящих головок и определяет время получаемой искусственной реверберации $T_н$. Затухание A и время реверберации $T_и$ связаны между собой зависимостью

$$A = \frac{60\,\tau}{T_и},\ \partial б, \text{ или } T_и = \frac{60\,\tau}{A},\ сек.$$

Количество импульсов равно числу головок, и эти импульсы будут раздельно слышны на выходе ревербератора. Как видно из рисунка, уровень сигнала на последней головке еще достаточно велик, благодаря чему обрыв процесса реверберации будет отчетливо ощущаться.

Реверберационный звук такого примитивного ревербератора не будет непрерывным, поэтому для практического применения такой ревербератор не годится, так как для получения непрерывного звука потребовалось бы установить очень много головок, что практически трудно выполнимо.

Самый простой ревербератор (рис. 10) имеет по одной головке записи и воспроизведения, которые связаны цепью обратной связи. Сигнал поступает на вход усилителя записи *УЗ* ревербератора, усиливается, записывается с помощью головки *ГЗ*, а спустя время τ_1 воспроизводится головкой *ГВ*, усиливается усилителем воспроизведения *УВ* и подается на громкоговоритель. Одновременно запаздывающий сигнал с *УВ* с затуханием подается снова на вход усилителя записи, через время τ_2 воспроизводится и т. д.

Если первоначальный входной сигнал имел форму короткого импульса длительностью меньше τ, то благодаря обратной связи на

ленте запишется новый сигнал с интервалом τ и амплитудой, меньшей первоначальной. Этот сигнал снова воспроизведется и запишется; подобный цикл будет повторяться до тех пор, пока уровень последнего сигнала не сравняется с уровнем шума магнитофона. В результате получится последовательность убывающих по амплитуде импульсов.

В качестве ревербератора с одной головкой воспроизведения можно использовать любой магнитофон, имеющий раздельные усилители записи и воспроизведения (МАГ-8М, МЭЗ-28, МАГ-59, «Тембр» и др.), соединив выход *УВ* с входом *УЗ*.

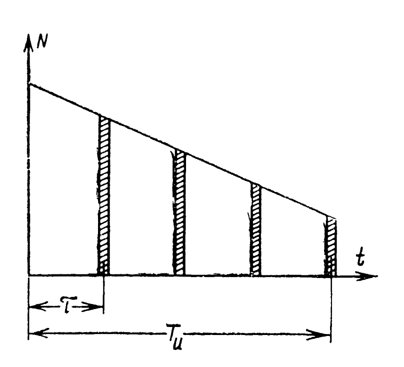


Рис. 9. Импульсная диаграмма затухания сигнала в ревербераторе с четырьмя головками воспроизведения без обратной связи.

Рис. 10. Схема обратной связи в магнитофоне с раздельным усилителем записи и воспроизведения для получения эффекта реверберации.

Уровень сигнала в цепи обратной связи такого ревербератора зависит от уровня записывающего сигнала и от коэффициента усиления в *УВ*.

Подбор необходимого уровня осуществляется регулятором громкости *УВ* и отдельным регулятором глубины реверберации *R* (1 *ком*). При большом уровне входного сигнала, например при записи с трансляции, регулировка глубины реверберации затруднительна, поэтому входной сигнал приходится подавать на второй или третий каскад *УЗ*.

Время запаздывания повторного сигнала зависит от скорости движения магнитной ленты v, расстояния между записывающей и воспроизводящей головками l и определяется по формуле

$$\tau = \frac{l}{v}, \text{ сек.}$$

Если учесть, что предельное время запаздывания повторного сигнала не должно превышать 50 *мсек*, то при стандартных скоростях движение ленты 76; 38 и 19 *см/сек* расстояния между рабочими зазорами головок должны быть 4,6; 2,3 и 1,15 *см*. В указанных выше аппаратах эти расстояния превышают расчетные, и все же получить эффект реверберации при существующих расстояниях вполне возможно.

Дело в том, что величина предельного запаздывания зависит от вида звучания. Так, указанное время 50 *мсек* соответствует критическому запаздыванию для речи, произносимой со средней скоростью 6—7 слогов в 1 *сек*. Для речи, произносимой со скоростью 3—5 слогов в 1 *сек*, критическое время увеличится до 80—90 *мсек*. Для музыкальных произведений предельное запаздывание гораздо больше, чем для речи, и может доходить до 150—200 *мсек* в зависимости от характера и стиля исполняемой музыки. Поэтому при использовании промышленных магнитофонов для получения эффекта реверберации наилучшие результаты можно получить при исполнении медленной, плавной музыки, протяжной песни и крайне замедленной речи.

В вышеуказанных магнитофонах наиболее эффективная запись искусственной реверберации обеспечивается при скорости движения магнитной ленты 38 *см/сек* и существующем расстоянии между головками. При скорости 76 *см/сек* без изменения расстояния между головками запись искусственной реверберации менее эффективна.

Для скорости 19 *см/сек* необходимо применять малогабаритные магнитные головки (кольцевые головки имеют слишком большие размеры), а для скорости 9,5 *см/сек* получить удовлетворительный эффект реверберации данным способом при стандартных габаритах магнитных головок невозможно.

При слишком большом расстоянии между головкой записи и головкой воспроизведения, что соответствует большому времени пробега ленты между этими головками при малых скоростях, будет наблюдаться эффект многократного эха.

Неожиданное применение этому эффекту нашлось в медицине. Если записывать речь с помощью магнитофона, имеющего раздельные усилители записи и воспроизведения, и одновременно прослушивать себя через наушники, то при определенном времени задержки записываемого сигнала можно обнаружить интересное явление. Говорящий начинает заикаться, повторять отдельные слоги, а то и вообще пропускать их. В данном случае слышится как бы эхо записываемой речи, которое дезориентирует мысленный контроль при построении фразы.

Если предложить глухому человеку провести такой опыт, то речь его будет ровной, на него эхо не воздействует. Применяя этот метод «отставания речи», можно изучать влияние запаздывания сигналов на формирование речи и выявлять симуляцию глухоты.

Для улучшения реверберационного эффекта можно применять специальную двух- или трехщелевую головку воспроизведения с одной общей обмоткой. Для получения разных тембров звучания при прохождении магнитной ленты относительно зазоров последние должны иметь разную ширину. Расстояние между зазорами выбирается в зависимости от скорости движения магнитной ленты, но так, чтобы время запаздывания сигналов не превышало 40—60 *мсек*. Уровень сигнала в такой головке выше по сравнению с обычной головкой воспроизведения.

В самодельных ревербераторах можно рекомендовать довольно простое устройство, позволяющее плавно изменять расстояние между записывающей и воспроизводящей головками и тем самым изменять характер реверберационного эффекта. Устройство такого приспособления показано на рис. 11. Между *ГЗ* и *ГВ* на подвижном кронштейне устанавливают металлический обводной ролик, подоб-

ный обводному ролику магнитофона МАГ-8. Кронштейн представляет собой металлический стержень, свободно перемещающийся в полом цилиндре, укрепленном с внутренней стороны платы лентопротяжного механизма. С одного конца стержень прикрепляется к пружине, с другого имеет резьбу. При перемещении гайки по этой резьбе стержень под действием пружины будет плавно отходить от нейтрального положения, увеличивая расстояние между головками, т. е. увеличивая время пробега. Для оси обводного ролика в плате лентопротяжного механизма необходимо сделать прорезь. Обводной ролик устанавливается в подшипнике, чтобы свести к минимуму увеличение натяжения ленты, что может вызвать проскальзывание ленты между тонвалом и прижимным роликом магнитофона, а значит, появление характерного «плавания» звука. Направляющие стойки желательно выполнить также в виде малогабаритных подшипников. Установка такого приспособления целесообразна лишь при больших скоростях движения ленты.

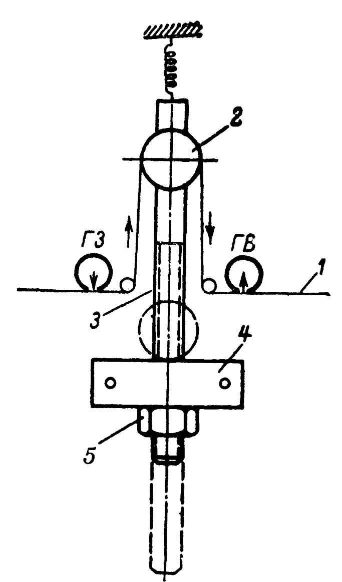


Рис. 11. Устройство регулирования времени пробега магнитной ленты между *ГЗ* и *ГВ*.

1—магнитная лента; *2*—обводной ролик; *3*—подвижной стержень; *4*—полый цилиндр (со стороны крепежной планки); *5*—гайка.

Особенностью использования магнитофона в качестве ревербератора является то, что получить приемлемую частотную характеристику реверберации удается лишь при небольшом времени реверберации (до 1,5 *сек*). Впрочем, применение больших величин времени реверберации при записи и перезаписи любительских магнитных фонограмм бывает нецелесообразно по художественным соображениям.

В общем случае ревербератор с одной связанной головкой воспроизведения обладает тем недостатком, что при сравнительно больших значениях времени реверберации коэффициент обратной связи близок к единице. Это приводит к тому, что при неточной установке коэффициента обратной связи или незначительном отклонении частотной характеристики от горизонтальной прямой возникают очень большие отклонения времени реверберации от заданного значения. Так, если принять, что $\tau = 50$ *мсек*, а необходимое время реверберации $T_{И} = 1{,}5$ *сек*, то $A = \frac{60\tau}{T} = 2$ *дб*. Из этого следует требование очень точного поддержания усиления в тракте обратной связи. При изменении затухания A в пределах ± 1 *дб* время реверберации $T_{И}$ будет изменяться от 1 до 3 *сек*. Требования

к линейности всех элементов ревербератора повышаются, так как импульсный сигнал реверберации на выходе аппарата может сложиться с прямым звуком приблизительно равной амплитуды, но в противофазе, вследствие чего полезный сигнал уменьшится, а нелинейные искажения системы будут особенно подчеркнуты.

Таким образом, этот метод можно рекомендовать только в тех случаях, когда необходимо получить небольшое время реверберации без регулировки ее уровня относительно уровня исходного сигнала.

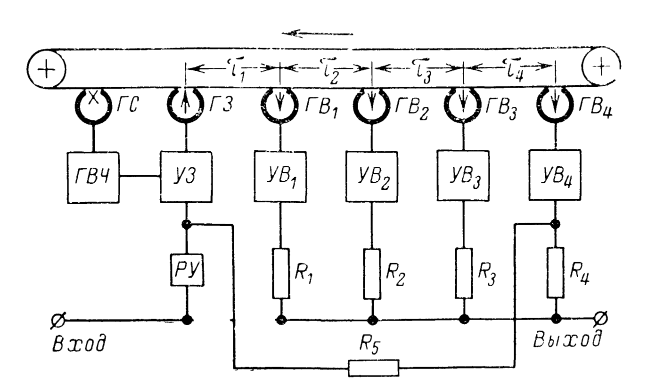


Рис. 12. Блок-схема ревербератора с обратной связью.

Длительность входного сигнала может быть больше времени пробега носителя между головкой записи и головкой воспроизведения, связанной цепью обратной связи с входом усилителя записи. В этом случае имеет место характерное для магнитного ревербератора явление взаимодействия между прямым сигналом на входе усилителя записи и сигналами, создаваемыми действием обратной связи. В зависимости от соотношения фаз этих сигналов может происходить ослабление или усиление результирующих сигналов, и на выходе ревербератора будут наблюдаться регулярные флуктуации напряжения.

Для уменьшения этого эффекта и повышения плотности спектра реверберационного сигнала между записывающей головкой и головкой обратной связи помещают несколько воспроизводящих головок. При этом расстояние между головками воспроизведения выбирают по случайному закону. Если подать на вход такого ревербератора (рис. 12) кратковременный импульс, то возникает повторная запись, сдвинутая относительно первой по времени и пониженная по уровню.

Воспроизведение этого второго цикла снова теми же n головками равносильно воспроизведению основной записи второй группой головок в ревербераторе без обратной связи.

Вторая запись дает начало третьей и т. д., причем каждая запись соответствует как бы удлинению цепочки головок в n раз.

Чтобы уровень первого импульса нового цикла записи был меньше уровня последнего импульса предыдущего цикла, в цепь обратной связи включен резистор такого же сопротивления, что и в

цепи последней воспроизводящей головки ($R_5=R_4$). Так как длительность импульсов от каждой головки воспроизведения мала, то их можно изобразить отдельными точками, положение которых соответствует времени появления этих импульсов на выходе ревербератора и логарифму амплитуд их уровней (рис. 13).

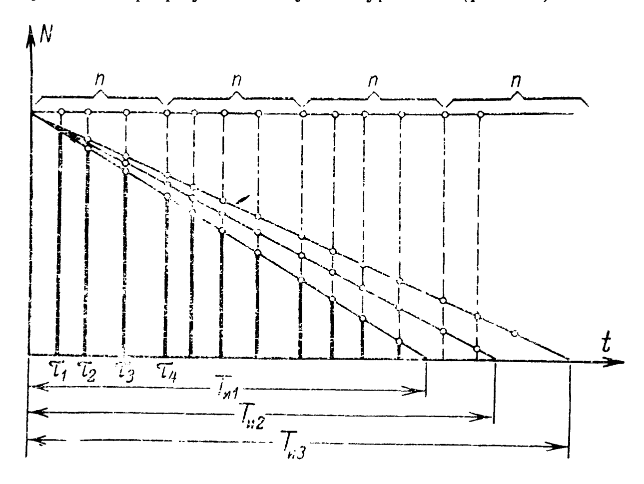


Рис. 13. Импульсная диаграмма затухания сигнала в ревербераторе с обратной связью.

Регулятор времени реверберации построен таким образом, что вносимые им затухания строго пропорциональны номеру головки, причем коэффициент пропорциональности меняется в зависимости от выбранного времени реверберации. Таким образом, при повороте регулятора точки, изображающие импульсы, будут лежать на лучах, исходящих из точки, лежащей на оси ординат и определяющей уровень записываемого сигнала (без затухания). Эти лучи исходят под разными углами, определяемыми временем реверберации ($T_{и1}$, $T_{и2}$, $T_{и3}$).

Если регулятор реверберации не вносит затухания, то уровень сигнала, возвращающегося в усилитель записи, равен уровню исходного сигнала (коэффициент обратной связи $\mu = 1$). При этом все импульсы имеют одинаковый уровень и представляющие их точки лежат на горизонтальной прямой. Этот случай соответствует неустойчивому состоянию системы — ревербератор возбуждается.

Основной недостаток магнитного ревербератора заключается в том, что флуктуация и при такой схеме размещения магнитных головок не устраняется. Дело в том, что флуктуация зависит от соотношения частоты входного сигнала и времени пробега носителя между головкой записи и головкой воспроизведения, включенной в цепь обратной связи. Поэтому частотная характеристика магнитного ревербератора имеет гребенчатую форму (рис. 14).

Каждый пик графика соответствует условию, когда сигнал обратной связи находится в фазе с входным сигналом и таким обра-

зом усиливает его. Впадины соответствуют отрицательной фазе обратной связи. Это происходит на частотах с интервалами

$$\frac{1}{\tau}; \quad \frac{2}{\tau}; \quad \frac{3}{\tau} \text{ и т. д.}$$

Для получения плотного спектра реверберации необходима большая частота повторений импульсов; для устранения флуктуации — тесное расположение максимумов на частотной характеристике. Нетрудно видеть, что эти требования противоречивы. Для первого из них необходимо малое время запаздывания τ между сигналами с головок, но малое τ означает большую частоту $1/\tau$ и, следовательно, большие интервалы между максимумами частотной характеристики.

Если принять, что $\tau_1 = 50$ *мсек*, то интервал между соседними пиками на всей частотной характеристике ревербератора будет равен $1 / \tau_1 = 20$ *гц*.

Если $\tau_2 = 25$ *мсек*, то этот же интервал будет равен 40 *гц*, а значит, флуктуация будет прослушиваться более заметно.

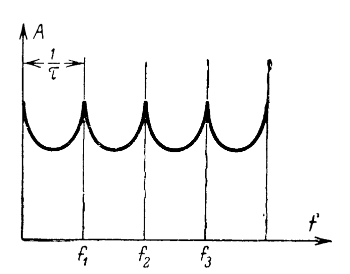


Рис. 14. Частотная характеристика процесса реверберации в магнитном ревербераторе.

В некоторых ревербераторах для повышения плотности спектра и снижения эффекта тональной окраски звука применяют три головки обратной связи. Если головки установлены с интервалами τ_1, τ_2, τ_3, то последовательность повторно записываемых импульсов вскоре делается равномерной с интервалом, равным наибольшему времени пробега. При этом эффект тональной окраски реверберации и недостаточная плотность спектра затухающих сигналов остаются.

В общем случае при любом числе головок обратной связи всегда есть частоты, на которых повторные сигналы приходят в фазе с исходным. Таким образом, вышеуказанные недостатки магнитного ревербератора являются принципиальными.

На качество реверберационного процесса большое влияние оказывает скорость движения магнитоносителя. При малой скорости удлиняются интервалы ($\tau = 50 \div 70$ *мсек*) — процесс затухания разрежен; при большей скорости время пробега носителя сокращается ($\tau = 10 \div 15$ *мсек*), но при этом исчезает впечатление просторности имитируемого помещения, так как в реальном помещении за это время (10—15 *мсек*) звуковая волна пройдет путь всего около 5 *м*. На практике время пробега носителя выбирают в пределах от 30 до 50 *мсек*. В музыке и пении при таком времени пробега разрывов не заметно, но речь передается не всегда удовлетворительно.

Правильность работы магнитного ревербератора определяется только такими практически независимыми от времени свойствами, как частотная характеристика отдельных элементов ревербератора и значения сопротивлений в регуляторе реверберации. Проверку качества реверберации проводят по кривым, регистрируемым самописцем на выходе ревербератора при воздействии на его вход различных сигналов. Короткой посылке колебаний звуковой частоты соот-

ветствует импульсная диаграмма, а длительному синусоидальному сигналу с медленно изменяющейся частотой — частотная характеристика.

К достоинствам магнитного ревербератора следует отнести широкий интервал плавной регулировки времени реверберации (от 1 до 10 *сек*), оперативность управления временем реверберации и изменения частотной характеристики, а также малые нелинейные искажения. Кроме того, магнитный ревербератор позволяет получить специальные звуковые эффекты в виде многократных сложных эхо, которые широко используются в радиовещании, кино и пр.

КОНСТРУКЦИИ РЕВЕРБЕРАТОРОВ НА МАГНИТНОЙ ЛЕНТЕ

Первый промышленный образец магнитного ревербератора типа МКР-58 (магнитный контактный ревербератор) был выполнен Всесоюзным научно-исследовательским институтом звукозаписи в 1958 г. на основе теории магнитного ревербератора, разработанной Г. А. Гольдбергом и С. В. Шульгиным.

Применение первых магнитных ревербераторов представило практические возможности широкому кругу творческих работников —режиссерам в кино и театрах, звукорежиссерам на радио, музыкантам, специалистам-акустикам—оценить значение реверберации в звукопередачах. Первые ревербераторы были также использованы при грамзаписи и дублировании иностранных фильмов. Особенно интересные эффекты были получены с помощью этих ревербераторов в литературно-драматических передачах на радиовещании.

С использованием этих магнитных ревербераторов были опробованы опытные установки искусственной реверберации в театре им. Е. Вахтангова и Московском театре сатиры. Эти аппараты были применены и в первых опытах по регулированию акустики помещения.

Дальнейшей разработкой магнитного ревербератора типа МКР-58 явилась модель МКР-60. Эта модель была изготовлена в количестве нескольких экземпляров и предназначалась в основном для работы в амбиофонических установках.

Наиболее широкое применение нашли магнитные ревербераторы типа МЭЗ-45 (рис. 15). В этом аппарате отражены все принципиальные особенности магнитных ревербераторов, поэтому рассмотрим его работу подробнее. Ревербератор выполнен в виде настольной конструкции и состоит из лентопротяжного механизма, девяти усилителей воспроизведения, блока записи, блока оконечного усилителя, блока амбиофонии. Аппарат предназначен для искусственного увеличения реверберации. создания искусственного эха, амбиофонии, звукоусиления в помещениях и на открытом воздухе с задержкой усиленного прямого звука.

Блок-схема ревербератора представлена на рис. 16.

Входной сигнал с выхода микшерского пульта или непосредственно от микрофона поступает на линейный или микрофонный входы аппарата и далее на линейный трансформатор *Тр* или двухкаскадный микрофонный усилитель *МУ*. Переключатель $П_1$ позволяет переходить с микрофонного на линейный вход, а также подключать к схеме ревербератора генератор калибровки с частотой колебаний 400 *гц* для проверки отдельных каналов ревербератора. Через опе-

ративный регулятор уровня записи $РУ_1$ сигнал поступает на предварительный усилитель *ПУ*, выходной сигнал которого подается через усилитель блока записи *УЗ* на головку записи *ГЗ* и в канал прямого звука на оконечный усилитель *ОУ* и далее на выход ревербератора.

Усилитель блока записи *УЗ* имеет два регулятора частотной характеристики—низкочастотный и высокочастотный; эти регуляторы позволяют изменять тембр реверберирующего звука. Реверберирующий звук образуется в процессе записи сигнала на бесконечную петлю магнитной ленты и его последующего воспроизведения. Для обеспечения высококачественного режима записи в схеме блока записи предусмотрен генератор тока стирания и подмагничивания.

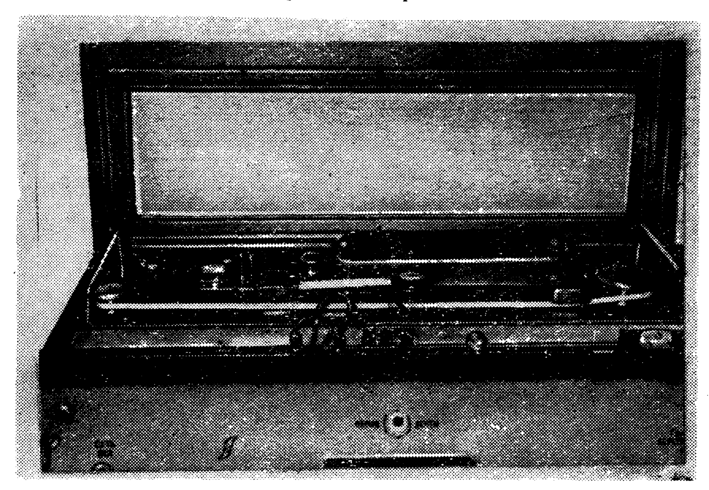


Рис. 15. Общий вид платы лентопротяжного механизма магнитного ревербератора типа МЭЗ-45.

Записанный на ленту сигнал воспроизводится с нарастающим запаздыванием последовательно девятью головками воспроизведения *ГВ*. Десятая, наиболее удаленная головка воспроизведения предназначена для создания эффекта эха. Каждая из девяти головок подсоединена к своему усилителю воспроизведения *УВ*. Головка «эхо» отдельного усилителя не имеет, и при ее использовании она подключается к девятому усилителю воспроизведения.

Каждый *УВ* снабжен выключателем *Вк*, позволяющим в необходимых случаях выключать усилитель. Выходы всех *УВ*, кроме первых двух, поступают на регулятор времени реверберации $РУ_2$ (затухание сигнала в цепи первого и второго *УВ* не регулируются). Затухание зависит от положения ручки этого регулятора. Это позволяет, сложив сигналы от всех звеньев регулятора, получить временной процесс с постепенным ослаблением уровня сигнала, имитирующего естественный процесс затухания звука в закрытом помещении. С помощью регулятора можно изменять время реверберации от 1 до 5 *сек*.

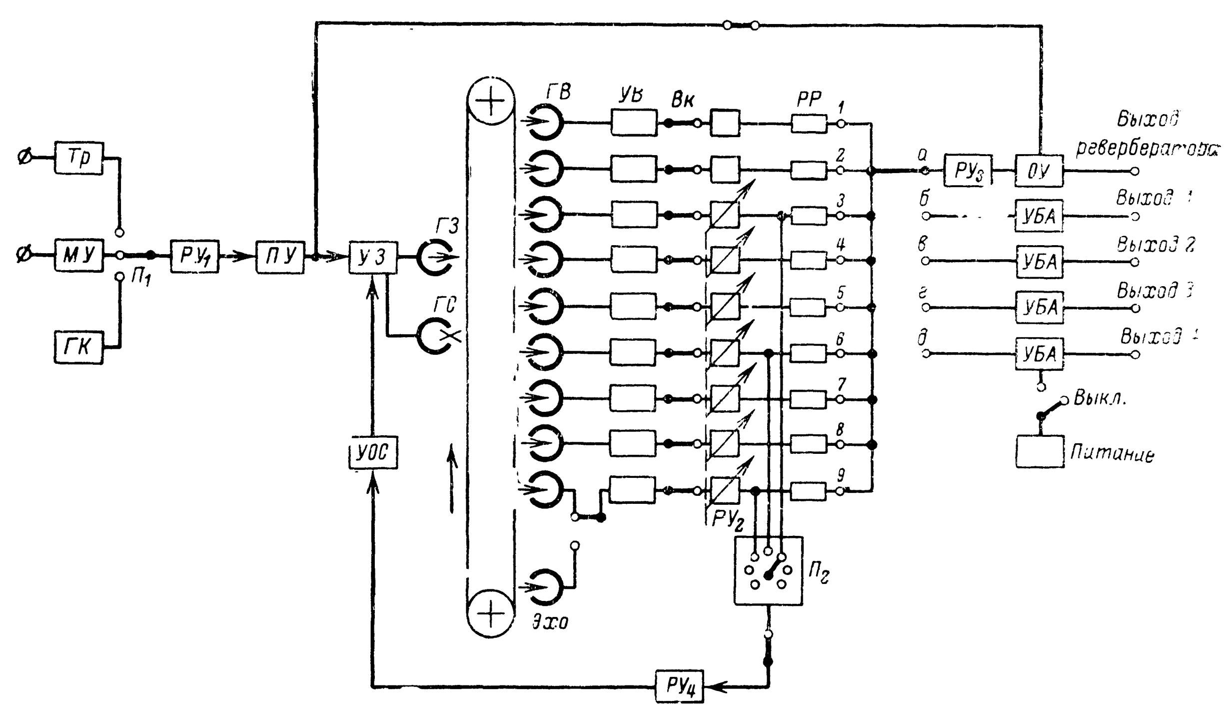


Рис. 16. Блок-схема ревербератора МЭЗ-45 в режиме реверберации.

Реверберирующий сигнал через разделительные резисторы *PP* поступает на вход оконечного усилителя, в котором происходит смешение его с сигналом, поступающим по каналу прямого звука. Регулятор $РУ_3$ позволяет в большей или меньшей степени «подмешивать» реверберирующий сигнал к прямому сигналу, поэтому он носит название регулятора уровня реверберации.

Чтобы увеличить количество запаздывающих сигналов и получить более слитное звучание реверберационного сигнала схемой предусмотрено введение сигналов от 3, 6 и 9-й головок воспроизведения обратно в канал записи. С этой целью выходы соответствующих звеньев регулятора $РУ_2$ соединены с переключателем $П_2$, позволяющим выбрать головку или сочетание головок воспроизведения или выключить обратную связь. Сигнал обратной связи с переключателя $П_2$ через регулятор уровня $РУ_4$ и усилитель обратной связи *УОС* поступает в усилитель блока записи.

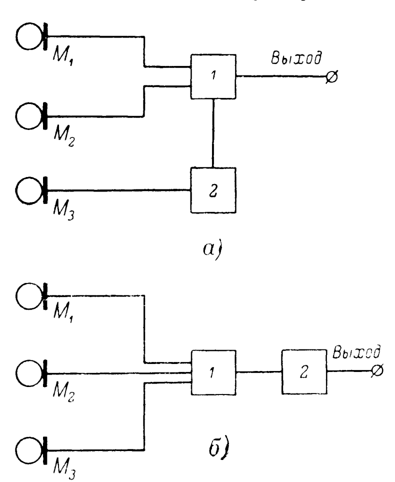


Рис. 17. Схемы включения магнитного ревербератора в канал звукопередачи.

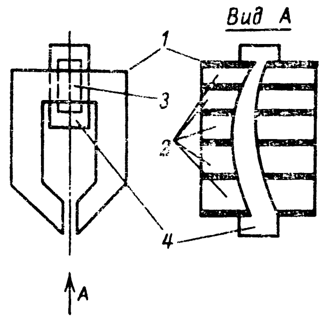


Рис. 18. Реверберационная головка воспроизведения с изменяющейся геометрией зазора.

В схеме аппарата имеется индикатор уровня типа РИ-58, позволяющий производить измерение на выходах всех усилителей воспроизведения, на выходе оконечного усилителя, а также на выходах всех четырех усилителей блока амбиофонии *УБА*.

Лентопротяжный механизм имеет один двухскоростной двигатель типа ДВД-1Р, схема прижима магнитной ленты обычная для профессиональных магнитофонов.

Предусмотрен автостоп при обрыве ленты. Частотная характеристика канала прямого звука — 30—15 000 *гц*, канала реверберации — 70—12 000 *гц*.

При эксплуатации ревербератора возможны несколько схем включения аппарата в тракт звукопередачи. Наиболее удобная схема работы ревербератора — параллельная с микшерским пультом (рис. 17, *а*). При такой схеме вблизи музыканта или группы музыкантов, исполнение которых следует записать с искусственной реверберацией, устанавливают несколько микрофонов, один из кото-

рых подключают к микрофонному выходу ревербератора *2*, а остальные — к входу пульта *1*. Для подмешивания реверберации к программе на микшерском пульте используют два раздельных регулятора уровня: один регулирует уровень прямого сигнала от всех микрофонов без реверберации, другой — уровень канала реверберации. При этой схеме прямой канал в ревербераторе не используется.

При последовательном соединении микшерского пульта и ревербератора (рис. 17, *б*) можно записать с реверберацией всех исполнителей. В этом случае выход микшерского пульта *1* подключают к линейному входу ревербератора *2*, а выход ревербератора к входу звукозаписывающей аппаратуры или к дальнейшему тракту звукопередачи.

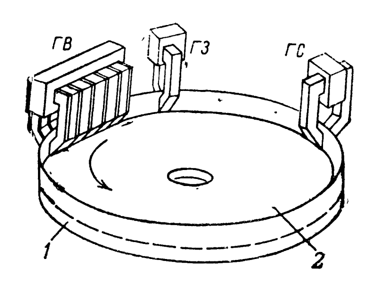


Рис. 19. Общий вид размещения магнитных головок в ревербераторе с наклеенной на диск магнитной лентой.

Существует довольно много различных ревербераторов с использованием магнитной ленты, но принцип действия этих аппаратов в основном не отличается от описанного.

В магнитных ревербераторах некоторых типов использованы оригинальные схемы и конструктивные решения отдельных узлов, описание которых приводится ниже.

В одном из зарубежных ревербераторов используется оригинальная воспроизводящая магнитная головка (рис. 18). Головка набрана из полюсов *1*, между которыми вставлены прокладки *2* различной толщины из немагнитного материала. Каждая пара полюсов имеет сердечник *3* из магнитного материала. Воспроизводящая головка имеет одну общую обмотку *4*. Полюсы расположены так, что зазор между ними искривлен по дуге и расширяется в направлении движения носителя. Носитель *1* (рис. 19) представляет собой ленту с магнитным наполнителем, наклеенную на вращающийся диск *2* так, что она выступает над диском. Носитель при вращении проходит в зазоре стирающей, записывающей и воспроизводящей головок, расположенных над краем диска. При этом число эхо-сигналов, интервалы между ними и их ослабление изменяются в зависимости от ширины зазора, числа полюсов и расстояния между полюсами. Воспроизводимые сигналы от каждой пары полюсов снимаются с общей обмотки, и поэтому все сигналы могут усиливаться одним усилителем.

В некоторых зарубежных ревербераторах для уменьшения количества магнитных головок принята двухканальная система записи и воспроизведения (рис. 20).

Записываемый сигнал подается одновременно на две головки записи, при этом между головкой записи первого канала и воспроизводящей головкой этого же канала получается временной сдвиг в 25 *мсек*, между головкой записи второго канала и воспроизводящей головкой второго канала получается временной сдвиг 40 *мсек* и т. д.

Сигнал с последней воспроизводящей головки как первого, так и второго каналов через цепь обратной связи снова подается одно-

временно на обе головки записи. В остальном этот магнитный ревербератор повторяет известные схемы. Подобная схема применена в некоторых зарубежных бытовых магнитофонах для создания эффекта реверберации при записи. Так, например, в стереомагнитофоне ТК-341 (четыре дорожки монозаписи), имеющем скорости

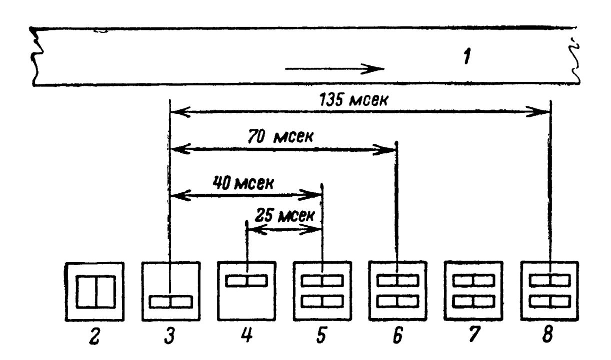


Рис. 20. Схема размещения магнитных головок в ревербераторе при двух каналах записи и воспроизведения.

1—магнитная лента; *2*—общая головка стирания; *3*—головка записи второго канала; *4* — головка записи первого канала; *5—8* головки воспроизведения.

19,05; 9,53 и 4,76 *см/сек,* предусмотрены как запись от внешнего источника сигналов, так и перезапись фонограммы с одной дорожки на другую с реверберацией.

РЕВЕРБЕРАТОРЫ С ПОСТОЯННЫМ МАГНИТОНОСИТЕЛЕМ

Склеенная в кольцо магнитная лента со временем изнашивается, возможны также ее обрывы. Склейка концов ленты должна производиться очень тщательно, да и хранение готовых колец требует особых условий. Все это создает определенные эксплуатационные неудобства, поэтому разработано несколько типов ревербераторов с постоянным магнитоносителем в виде барабанов, цилиндров, дисков и колец, которые не имеют контакта с магнитными головками.

Принципиально такие ревербераторы отличаются от описанных выше только механической системой носителя.

В магнитном ревербераторе типа Каррсон-107 применен массивный бронзовый диск, на цилиндрическую поверхность которого нанесен слой никель-кобальтового сплава, являющегося звуконосителем. Аппарат имеет 11 магнитных головок, расположенных по окружности диска. Сигнал обратной связи снимается с шестой и де-

вятой головок воспроизведения. На рис. 21 показана механическая часть ревербератора, установленная в нижней части шкафа; в верхней размещается усилительная аппаратура. Двигатель имеет две скорости вращения, при этом линейная скорость носителя равна 150 и 300 *см/сек*. В зависимости от скорости носителя минимальная задержка составляет 50 или 25 *мсек*, а максимальная задержка—450 или 225 *мсек*. Время реверберации можно менять от 1 до 8 *сек*.

Так как зазор между головками и звуконосителем очень мал (около 30 *мк*), к механической конструкции ротора предъявлены очень жесткие требования. Эксцентриситет вращения барабана в подшипниках не должен превышать 3 *мк*. Конструкция подшипников барабана должна удовлетворять этому требованию не только при выпуске ревербератора с завода, но и по истечении достаточно длительного срока эксплуатации. Несоблюдение всех этих условий приводит к появлению модуляционного шума. Все это является крупным недостатком ревербераторов такого типа.

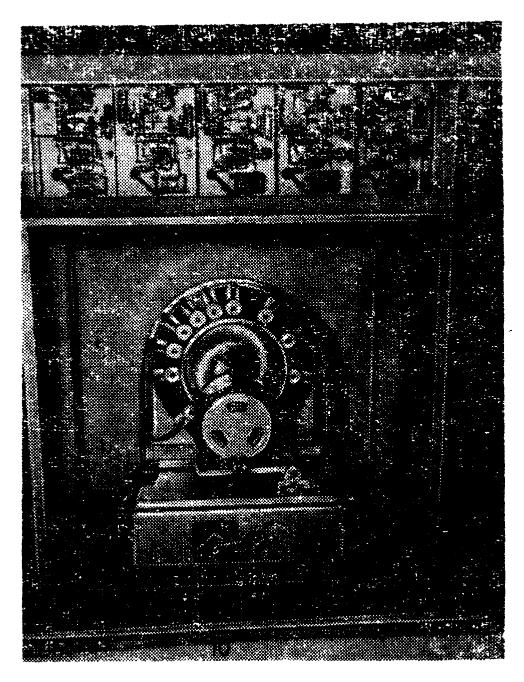


Рис. 21. Механическая часть ревербератора фирмы Каррсон.

В другом магнитном ревербераторе, предназначенном для стереофонической звукопередачи, использован барабан *1* из немагнитного материала, на который натянуты два резиновых кольца *2* и *2'*, покрытых порошком окисла железа. Вокруг поверхности каждого

кольца расположены магнитные головки: стирающая, записывающая, воспроизводящая (рис. 22).

Время пробега носителя τ от записывающей головки до воспроизводящей составляет 25—35 *мсек.*

Сигнал, поступивший на вход *3* левого канала, усиливается усилителем записи *4*, после чего разделяется на две составляющие. Одна из этих составляющих поступает в смеситель *5*, другая — в детектор *8* с заранее выбранной постоянной времени. В смесителе

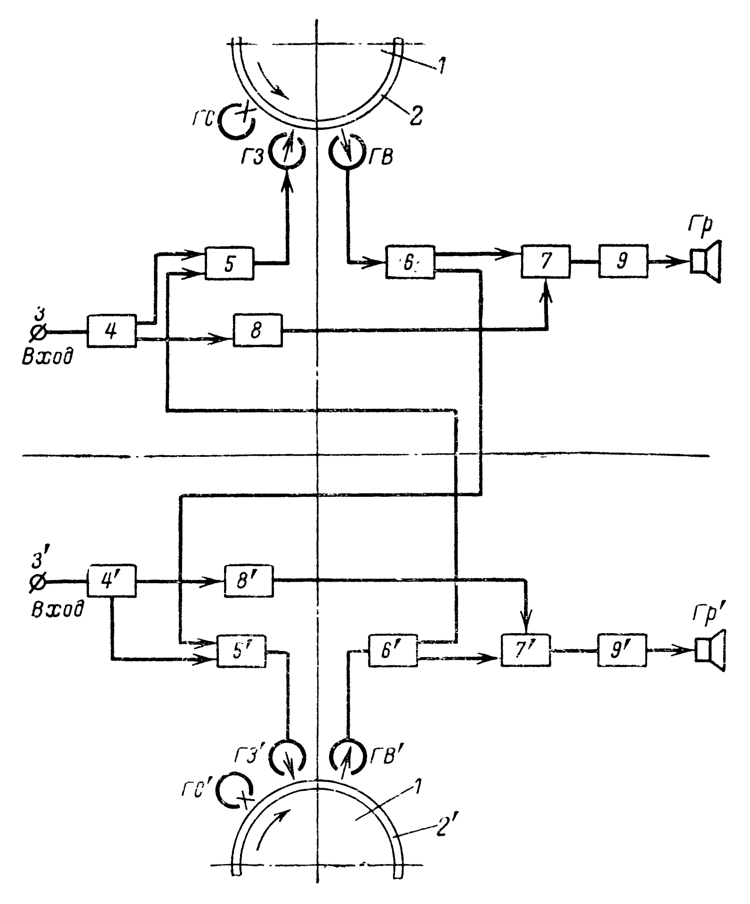


Рис. 22. Блок-схема ревербератора для стереофонической звукопередачи.

сигнал смешивается с воспроизведенным и ослабленным сигналами правого канала, после чего записывается магнитной головкой *ГЗ* на носителе *2*. По прошествии времени τ записанный сигнал воспроизводится магнитной головкой *ГВ*. С усилителя воспроизведе-

ния 6 сигнал подается на вход экспандера 7 и смесителя 5′ правого канала. Экспандер представляет собой усилитель, коэффициент усиления которого регулируется напряжением, возникающим при прохождении части сигнала с усилителя 4 левого канала через детектор 8. Выходной сигнал экспандера усиливается усилителем мощности 9 и поступает на громкоговоритель левого канала. Воспроизводимый сигнал после усилителя 6 подается в смеситель 5′ правого канала. Правый канал работает точно так же, как левый.

Графики на рис. 23 поясняют работу этого ревербератора. Допустим, что в какой-то момент времени t_0 на вход левого канала подан большой входной сигнал *А*, а на входе правого канала сигнал *А′* отсутствует. Этот сигнал записывается на первой дорожке головкой *ГЗ* и по истечении времени τ воспроизводится головкой *ГВ*. Воспроизведенный сигнал усиливается, и часть его подается на экспандер.

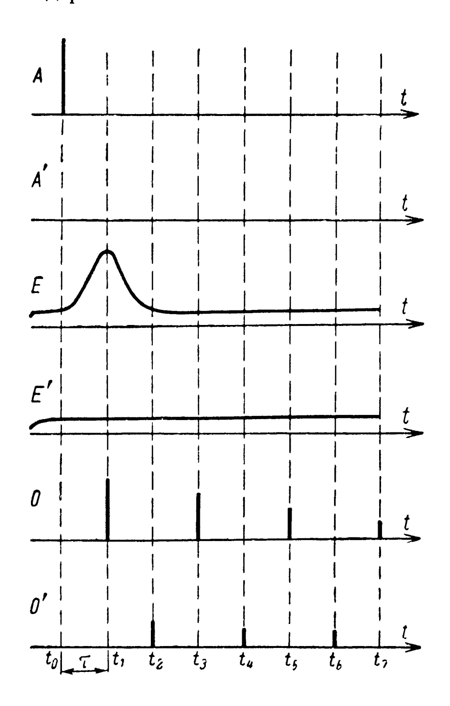


Рис. 23. Изменение уровня сигнала в каналах стереоревербератора.

В это время управляющее напряжение экспандера, полученное с входного усилителя 4, в результате его прохождения через детектор максимально (кривая *Е*). Поэтому сигнал левого канала 0 воспроизводится с высоким уровнем (время t_1), с выхода усилителя воспроизведения 6, после соответствующего ослабления сигнал проходит через смеситель 5′ и записывается на второй дорожке

головкой *ГЗ'*. По истечении времени τ он воспроизводится и подается на экспандер *7'*. Поскольку управляющее напряжение экспандера при отсутствии сигнала на входе правого канала минимально (кривая *E'*), то воспроизведенный сигнал 0' на выходе правого канала имеет низкий уровень (время t_2). Часть сигнала, считанного воспроизводящей головкой правого канала, проходит смеситель *5* и вновь записывается на первой дорожке головкой *ГЗ*. Затем он поступает на выход левого канала и вновь записывается на второй дорожке.

Этот процесс повторяется много раз с соответствующим ослаблением сигнала в том и другом каналах. Для простоты объяснения рассмотрен случай, когда сигнал поступает только в один канал; фактически процесс сложнее, так как сигналы подаются в оба канала.

Все ревербераторы, как с использованием магнитной ленты, так и с постоянным звуконосителем, обладают принципиальными недостатками, о которых говорилось выше. Эти недостатки сужают область применения магнитных ревербераторов, и за последнее время в профессиональной практике, в радиовещании, кино, телевидении для создания эффектов искусственной реверберации все чаще используют другие системы и аппараты.

Сотрудниками научно-исследовательского института звукозаписи и радиовещания С. В. Шульгиным и В. И. Лазаревым предложена принципиально новая схема получения реверберационного сигнала. Эта схема воплощена в новом магнитном ревербераторе типа МЭЗ-78, в котором удалось получить достаточную плотность реверберационного сигнала и избежать флуктуации.

Аппарат имеет постоянный магнитоноситель в виде барабана.

На цилиндрическую поверхность барабана, установленного вертикально, в виде магнитных дорожек нанесен ферромагнитный сплав кобальта, никеля и фосфора. Скорость вращения барабана постоянная — 750 *об/мин*, что соответствует линейной скорости носителя 95 *см/сек*. Вокруг барабана размещены 12 головок записи, 19 головок воспроизведения и одна головка стирания для всех дорожек.

Всего в аппарате 7 блоков основной задержки и 5 блоков перезаписи. Каждый блок включает канал магнитной записи. Канал записи, входящий в блок основной задержки, имеет одну головку записи и две головки воспроизведения; канал блока перезаписи—одну головку записи и одну головку воспроизведения. Расстояние между записывающей головкой и воспроизводящими в каждом канале различное.

Принцип работы этого аппарата заключается в использовании временных задержек в каналах магнитной записи и в универсальных фильтрах. Временные задержки в универсальных фильтрах составляют 1,6 и 4,6 *мсек*, т. е. во много раз меньше, чем в блоках основной задержки, поэтому их использование не меняет времени реверберации, а лишь улучшает импульсную характеристику реверберационного сигнала. Определенный порядок включения блоков основных задержек позволяет сформировать реверберационный сигнал или получить эффекты эха.

Глава четвертая

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ

ЛИСТОВОЙ РЕВЕРБЕРАТОР

Листовой ревербератор представляет собой стальной лист размерами 1×2 *м*, вертикально укрепленный с помощью восьми пружинных амортизаторов за углы в раме из стальных труб (рис. 24).

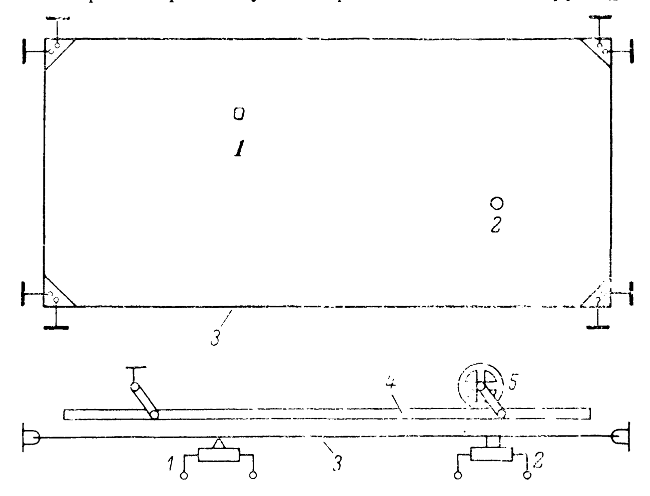


Рис. 24. Схематическое изображение листового ревербератора.

1—вибровозбудитель; *2*—вибросниматель; *3*—металлический лист; *4*—демпфирующая плата; *5*—привод.

Рама установлена в деревянном или металлическом коробе со съемными боковыми стенками. Колебания листа возбуждаются электродинамической системой, аналогичной применяемой в динамических громкоговорителях.

Электродинамический вибровозбудитель представляет собой магнитную систему со звуковой катушкой, намотанной на каркас из латуни. Сопротивление звуковой катушки 12,5 *ом*. Каркас скреплен с основанием полого металлического конуса, вершина которого сварена с листом в центре точечной сваркой. Сигнал звуковой частоты подается в звуковую катушку вибровозбудителя от усилителя возбуждения. Возбужденные в стальном листе механические колебания воспринимаются виброснимателем (датчиком). Пьезоэлектрический элемент датчика представляет собой пластину тита-

ната бария толщиной 1 *мм* и диаметром 12 *мм*. Датчик прикреплен к листу на некотором расстоянии от возбудителя.

Электронный блок ревербератора, включающий усилитель возбуждения, усилитель воспроизведения и блок питания, установлен в коробке с выведенными на лицевую панель соединительными колодками и сигнальными лампочками.

Колебания, создаваемые возбудителем, распространяются в виде поперечных волн, претерпевающих многократные отражения от краев листа. При этом в листе возникает большое количество взаимно интерферирующих собственных колебаний подобно тому; как это происходит в помещении. Вибросниматель принимает помимо прямой изгибной волны от возбудителя еще и повторные запаздывающие отражения этой волны. Эти колебания при своем распространении в стальном листе имеют затухающий характер из-за тепловых потерь. Вследствие небольшой скорости распространения волн двумерный процесс их затухания может имитировать процесс отзвука в большом помещении при сравнительно малых размерах листа. Затухания изгибных волн пропорциональны частоте и обратно пропорциональны толщине листа. Для получения большой плотности спектра колебаний изгиба, а значит и хорошего качества реверберирующего звука, лист должен быть достаточно тонким.

Для получения нужного механического напряжения при изгибе минимальная толщина листа при заданной площади его поверхности выбирается равной 0,5 *мм*. При такой толщине для предотвращения разрыва листа на углах подвеса делаются утолщения.

В общем случае соотношения площади S и толщины b сказываются на частотной характеристике стального листа. Так, если использовать лист с $S = 1$ *м*^{2} и $b = 10$ *мм*, звук приобретает неприятный металлический характер.

Такие материалы, как алюминий, медь, латунь и бронза, обладающие хорошей теплопроводностью, не применяются для изготовления реверберационного листа, так как имеют высокие значения коэффициента поглощения поперечных волн.

Кроме того что материал листа не должен создавать большого затухания волн, лист должен иметь также совершенно ровную поверхность для того, чтобы можно было максимально приблизить к нему демпфирующую плату. Получить холодной прокаткой совершенно ровный стальной лист толщиной 0,5 *мм* довольно трудно. Поэтому листы отбирают из большого количества заготовок, подвешивают в специальной раме и в течение нескольких дней подвергают механическому растяжению.

При основной частоте колебаний листа 3—5 *гц* волна значительно короче акустической волны в воздухе; по этой причине лист почти не излучает в пространство звуковую энергию. Однако у пластины образуется стационарное звуковое поле, интенсивность которого убывает по экспоненте с увеличением расстояния от листа. Энергию этого поля, а, следовательно, и колебания листа можно уменьшить внесением в это поле демпфирующей платы из пористого материала. Для получения независимости затухания от частоты поглотитель должен быть достаточно тонким по сравнению с длиной волны стационарного звукового поля. Для этого применяют спрессованное стекловолокно толщиной 0,8 *мм*, нанесенное на металлические пластинки размерами 200×200 *мм*, закрепленные в раме из уголков. Эти пластинки образуют демпфирующую плату.

Возбудитель и звукосниматель укрепляются с одной стороны стального листа, с другой строго параллельно этому листу устанавливают демпфирующую плату. С помощью несложного механизма эта плата может плавно приближаться и отодвигаться от листа. На рис. 25 показан листовой ревербератор со стороны демпфирующей платы. Из-за неровностей стального листа и демпфирующей платы минимальное расстояние между ними достигает 3 *мм*. Это соответствует максимально возможному затуханию колебаний листа, а значит, минимальному времени реверберации 0,8 *сек*. При этом частотная характеристика времени реверберации прямолинейна в широком

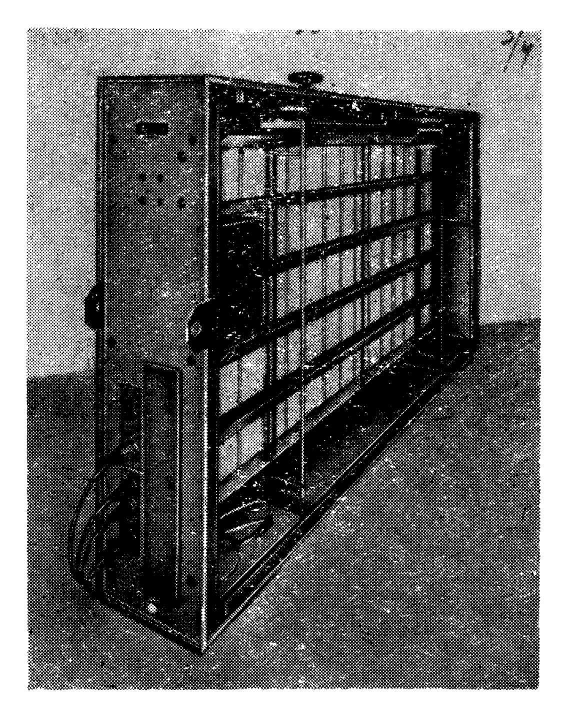


Рис. 25. Общий вид листового ревербератора со стороны демпфирующей платы. (Боковая крышка снята.)

диапазоне частот. Это объясняется тем, что затухание, обусловленное близостью пористого поглотителя, параметры которого не зависят от частоты, преобладает над затуханием, связанным с потерями на внутреннее трение в материале листа. По мере увеличения расстояния между листом и демпфирующей платой увеличивается время реверберации, причем на частотной характеристике наблюдается подъем низких и завал высоких частот.

При наибольшем удалении платы время реверберации максимально, так как в этом случае затухание определяется только внутренними потерями в пластине. При этом частотная характеристика

становится неудовлетворительной, так как сильно подчеркиваются низкие частоты (рис. 26). Так, при расстоянии между платой и пластиной 120 *мм* максимальное время реверберации на частоте 100 *гц* равно 11 *сек*, а на частоте 500 *гц* это время равно 5,3 *сек*.

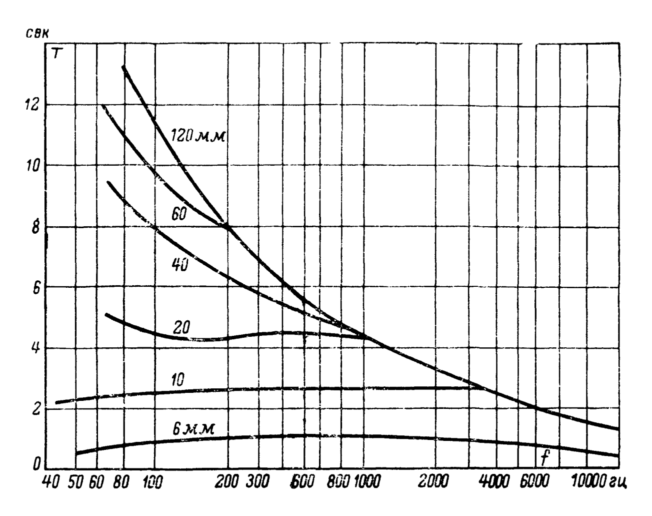


Рис. 26. Частотная характеристика времени реверберации листового ревербератора при различных положениях демпфирующей платы.

Главной причиной подъема частотной характеристики на низких частотах является зависимость величины внутренних потерь от частоты колебаний в стальном листе: чем выше частота, тем больше потери. Эта зависимость вытекает из особенностей дисперсной среды, которую представляет собой стальной лист, где скорость распространения поперечных волн пропорциональна корню квадратному из частоты, т. е.

$$v = \sqrt{fb},$$

где f — частота колебаний;
b — толщина пластины.

Этот недостаток листового ревербератора можно устранить, применив дополнительное демпфирование, вносящее затухание, обратно пропорциональное частоте.

Критерием сравнения искусственно создаваемой реверберации с естественным процессом реверберации является характер последовательности эхо-сигналов в процессе затухания.

Как указывалось выше, в пластине, являющейся двумерной системой, так же как и в трехмерном помещении, происходит многократное отражение, вызывающее ряд собственных резонансов. Замедленное следование эхо-сигналов при низких частотах равносильно уплотнению спектра на этом участке частот. Таким образом, плотность спектра отражений в стальном листе, вначале очень большая

по всей частотной характеристике листа, затем уменьшается, особенно на высоких частотах.

В реальном помещении все происходит наоборот; вначале спектр собственных частот сравнительно редок, а затем быстро уплотняется пропорционально квадрату частоты. Отсюда вытекает, что нижний участок спектра в стальной пластине значительно больше уплотнен собственными частотами, чем это имеет место в помещениях.

В данном случае для листового ревербератора средняя плотность собственных частот приблизительно равна двум, т. е. на частотный интервал в 1 *гц* приходится приблизительно две собственные резонансные частоты. Это соответствует средней плотности спектра собственных частот эхо-комнаты объемом 3×4×5 *м* при частоте около 300 *гц*.

Из сравнения листового ревербератора с магнитным ревербератором можно сделать вывод, что акустические свойства первого ближе к естественным условиям процесса затухания звука.

Помимо этого, отсутствие в конструкции листового ревербератора вращающихся частей и сравнительно небольшая стоимость привели к тому, что листовым ревербераторам в студиях звукозаписи, на радио и телецентрах отдают предпочтение перед эхо-камерами и магнитными ревербераторами.

С другой стороны, для имитации реверберационного процесса в большом помещении необходима «помощь» магнитного ревербератора. Дело в том, что время пробега поперечной волны в стальном листе от возбудителя до снимателя на частоте 1 000 *гц* составляет всего 6 *мсек*, что соответствует пробегу звуковой волны в воздухе примерно около 2 *м*. Так как в обычных помещениях время задержки между прямым звуком и первыми отражениями значительно больше, то стальной лист не может создать впечатления реверберации большого зала. Поэтому желательно в структуре ранних отражений обеспечить интервал между прямым звуком и первым импульсом примерно 20—40 *мсек*, а далее импульсы должны поступать более часто (через каждые 10—15 *мсек*). Этого можно достичь только последовательным включением магнитного ревербератора в цепь листового ревербератора. Такая система может вполне удовлетворительно имитировать процесс реверберации в большом помещении.

Для частичной компенсации характерных недостатков листового ревербератора частотные характеристики усилителя возбуждения и усилителя воспроизведения должны иметь вид, показанный на рис. 27. Особенности этих характеристик объясняются следующими причинами: нелинейные искажения в пластине и усилителях растут с уменьшением частоты и с увеличением времени реверберации; в пределах линейности стараются поднять уровень сигнала возбуждения пластины для уменьшения влияния внешне акустических помех из-за естественного спада уровня сигнала в стальном листе в области верхних частот.

С учетом всех этих факторов частотная характеристика усилителя возбуждения имеет сильный подъем на верхних частотах. Характеристика усилителя воспроизведения также имеет незначительный подъем на частотах после 3,5 *кгц*. Подъем частотной характеристики на 8 *дб* в области нижних частот в усилителе воспроизведения вызван желанием подчеркнуть субъективное ощущение реверберации при малых значениях времени реверберации, которое, как известно, сказывается особенно на низких частотах.

Листовой ревербератор чувствителен к механическим вибрациям и звуковым колебаниям. Внешнее акустическое воздействие начинается примерно с уровня шума 50—55 *дб*. По этой причине ревербератор устанавливают в специальном помещении, изолированном от механических и акустических помех. При этом напряжение шума на выходе усилителя воспроизведения может все же достичь 25 *мв*, что объясняется влиянием инфразвуков, которые хорошо передаются по конструкциям здания. Для устранения этого явления ревербератор подвешивают на пружинах к потолку, изолируя его тем самым от пола и стен.

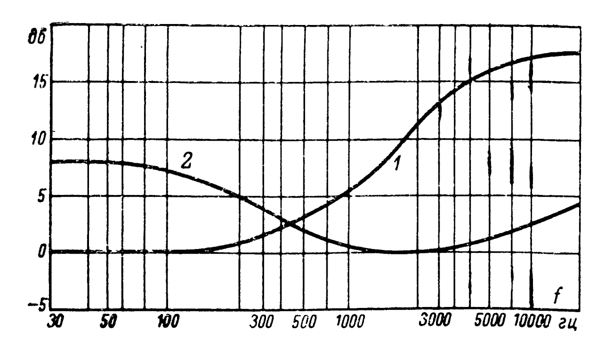


Рис. 27. Частотные характеристики усилителя возбуждения (*1*) и усилителя воспроизведения (*2*).

Как указывалось выше, реверберационный лист почти не излучает звуковую энергию, поэтому в одном помещении можно устанавливать несколько ревербераторов одновременно без опасения воздействия одного на другой.

Управление временем реверберации и ее уровнем осуществляется дистанционно с пульта управления звукорежиссера с помощью электропривода, приближающего и удаляющего демпфирующую плату.

Установка требуемого времени реверберации контролируется с помощью стрелочного индикатора.

Другой способ регулирования — изменение соотношения мощности прямого и реверберирующего сигналов — осуществляется обычным способом с помощью смесительного устройства.

Блок-схема устройства с листовым ревербератором представлена на рис. 28.

На микшерском пульте есть два отдельных регулятора, один из которых служит для регулирования уровня прямого сигнала ($РУ_3$), а другой — для регулирования реверберационного сигнала $РУ_2$.

Уровень сигнала от ревербератора обычно выбирают на 6 *дб* ниже, чем уровень сигнала в прямом канале.

Подаваемый на ревербератор сигнал также регулируют с помощью микшера $РУ_1$. Для предотвращения нежелательной связи выхода ревербератора с его входом в канал прямого сигнала включен разделительный каскад *РК* (катодный повторитель).

В ревербераторе другого типа возбудитель и звукосниматель не имеют сварного контакта с листом: необходимый рабочий контакт

осуществляется регулируемым нажимом подвижной части преобразователей на лист. При этом преобразователи могут быть отодвинуты при транспортировке от стального листа специальным устройством. Благодаря этому система подвеса листа уже не является критичной, такой ревербератор удобно транспортировать, т. е. использовать его при внестудийных передачах. Максимальное время

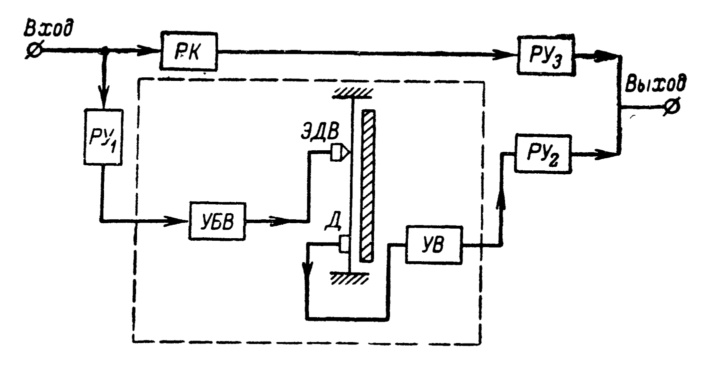


Рис. 28. Схема включения листового ревербератора.
УБВ—усилитель блока возбуждения; *ЭДВ*—электродинамический возбудитель; *Д*—датчик; *УВ*—усилитель воспроизведения; *РК*—разделительный каскад (катодный повторитель); *РУ*—регулятор уровня.

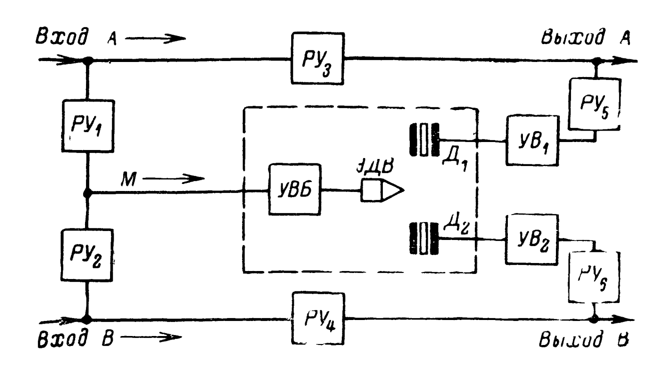


Рис. 29. Блок-схема включения стереофонического листового ревербератора.

реверберации этого аппарата составляет около 3 *сек*, но частотная характеристика времени реверберации более ровная.

Постоянно развивающаяся техника стереофонической записи предъявляет к студийному оборудованию все новые требования. Наиболее просто передавать стереофонический сигнал с искусственной реверберацией по двум каналам можно с помощью листового ревербератора. Стереофонический ревербератор должен получать кро-

ме сигнала, несущего информацию содержания, информацию направленности, что является одним из непременных условий стереопередачи. На рис. 29 показана блок-схема устройства с листовым ревербератором, предназначенного для работы в двухканальной стереосистеме. Часть напряжения сигналов с каналов *А* и *В* через балансные регуляторы уровня $РУ_1$ и $РУ_2$ смешивается вместе, образуя сигнал *М*. Сигнал *М* подается на вход усилителя возбуждения *УВБ* и далее на электродинамический возбудитель *ЭДВ*, возбуждающий колебания стального листа. В стереофоническом ревербераторе на стальном листе размещены два вибросниматели (датчика) $Д_1$ и $Д_2$ на разных расстояниях от возбудителя. Сигналы с каждого датчика, усиленные усилителями $УВ_1$ и $УВ_2$, являются некогерентными, т. е. полностью несвязанными. С каждого усилителя воспроизведения реверберационный сигнал поступает в свой канал прямого звука. С помощью регуляторов $РУ_3$ и $РУ_5$ устанавливают необходимый уровень прямого и реверберационного сигналов в канале *А*, а с помощью регуляторов $РУ_4$ и $РУ_6$ — в канале *В*.

Некогерентность является важным условием того, чтобы каналы получали статистически распределенную информацию направленности. При этом развитие соотношения сигналов датчиков зависит от частоты. Если, например, на ревербератор подать синусоидальный сигнал произвольной частоты, то между сигналами на выходах *А* и *В* могут возникнуть разнообразные соотношения фаз, из которых особый интерес представляют четыре соотношения:

Выход *А*	Выход *В*	Впечатление направленности
90°	0°	Эхо-сигнал справа
0°	90°	Эхо-сигнал слева
90°	90°	Эхо-сигнал из середины
90°	—90°	Эхо-сигнал со всех сторон

В графе «Впечатление направленности» обозначены направления, воспринимаемые как перемещения некоторого источника звука перед микрофонами каналов *А* и *В*. В действительности, конечно, кроме этих четырех случаев образуется произвольное число разнообразных комбинаций, зависящих от частоты.

Этот метод можно применить и при использовании эхо-камеры с одним громкоговорителем и двумя микрофонами, расположенными на разных расстояниях от громкоговорителя. Однако из-за того, что

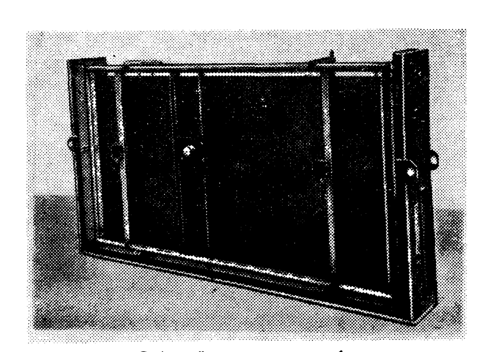


Рис. 30. Общий вид стереофонического листового ревербератора со стороны стального листа (боковая крышка снята).

плотность резонансов эхо-камеры меньше, чем у листового ревербератора, желаемый эффект, особенно на низких частотах, проявляется хуже, чем у листового ревербератора. На рис. 30 показан стереофонический вариант листового ревербератора. Электродинамический возбудитель размещен на вертикальных стойках в центре листа, а справа и слева от него на определенных расстояниях укреплены датчики.

ПРУЖИННЫЕ РЕВЕРБЕРАТОРЫ

Принцип действия пружинных ревербераторов известен сравнительно давно, еще в 1940 г. А. С. Грановским была предложена линия задержки, выполненная в виде резонансной системы, состоящей из ряда натянутых стальных струн с малым декрементом затухания и разными собственными частотами. Отдельные струны или группы струн приводились в колебания посредством электромагнитных преобразователей. Механические колебания с помощью звукоснимателя превращались в электрические. Индивидуальный для каждой струны звукосниматель мог быть заменен одним общим. В этом случае звукосниматель жестко был связан с деревянным корпусом установки, служащим акустическим резонатором для всех частот. Такое устройство, установленное на музыкальном инструменте — цитре — дало удовлетворительный эффект искусственной реверберации.

Достаточно широкое распространение пружинные ревербераторы получили только 8—10 лет назад. Ревербераторы этого типа дают худшее качество реверберационного сигнала, чем магнитные и листовые ревербераторы, но вместе с тем они компактны, конструктивно крайне просты и дешевы в изготовлении. По этим причинам они находят применение в бытовых звукоусилительных установках — приемниках, радиолах, магнитофонах, усилителях НЧ и в электромузыкальных инструментах.

Пружинные ревербераторы выпускаются встроенными в звукоусилительную аппаратуру или в виде отдельных приставок. Из-за ряда недостатков, о которых будет сказано ниже, пружинные ревербераторы в профессиональной аппаратуре почти не применяются. Задерживающим элементом в этих ревербераторах служит спиральная пружина, которая свободно натянута между двумя опорами. Принцип действия этого ревербератора прост. С одной стороны на пружину воздействует возбудитель, преобразующий подведенные электрические сигналы в механические колебания пружины. На другом конце пружины механические колебания с помощью выходного преобразователя (датчика) вновь преобразуются в электрические с задержкой во времени.

В общем случае в пружине могут возникать колебания трех различных видов: продольные, поперечные и крутильные. Независимо от вида колебаний все они распространяются в пружине с одной и той же скоростью, которая зависит только от материала и размеров пружины. В среднем скорость распространения колебаний составляет 1—2 *м/сек.*

В зависимости от вида колебаний находят применение входные и выходные преобразователи различных типов. При возбуждении продольных и поперечных колебаний в качестве входных преобразователей применяются электродинамические и электромагнитные системы, а в качестве выходных, кроме указанных выше систем, также и пьезоэлектрические.

Внешние сотрясения могут вызвать как продольные, так и поперечные колебания, поэтому при возбуждении поперечных и продольных колебаний ревербератор становится очень критичным к внешним сотрясениям, причем возможно появление микрофонного эффекта. Крутильных же колебаний в пружине внешние силы вызвать не могут. По этой причине в промышленных образцах пружинных ревербераторов применяется главным образом система кручения, которая намного устойчивее к помехам.

Для создания крутильных колебаний требуется особая конструкция входных и выходных преобразователей (рис. 31). На конце пружины установлен ферритовый ротор, расположенный между полюсными наконечниками П-образного магнитопровода с обмоткой. Ротор поддерживается тонкой немагнитной проволочкой из фосфористой бронзы. Конструкция входного преобразователя принципиально не отличается от выходного. При подаче сигнала в обмотку входного преобразователя, которая подсоединяется к усилителю низкой частоты, между полюсными наконечниками образуется магнитный поток, который воздействует на ферритовый ротор. Ротор поворачивается на определенный угол пропорционально мгновенному значению тока в обмотке, т. е. в соответствии с полярностью и амплитудой приложенного напряжения.

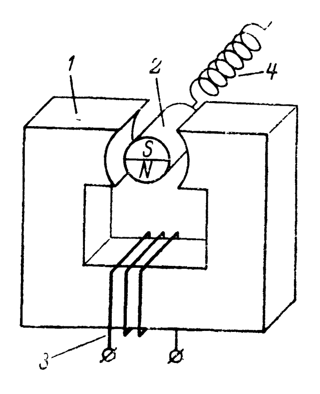


Рис. 31. Устройство входного преобразователя для создания крутильных колебаний в пружине.

1—магнитопровод; *2*—ферритовый ротор; *3*—обмотка; *4*—пружина.

Крутильные колебания передаются через пружину к ротору выходного преобразователя и поворачивают его. Магнитное поле ротора при этом наводит в обмотке выходного преобразователя э. д. с. Выходной сигнал с обмотки выходного преобразователя подается на усилительный каскад, к которому предъявляются такие же требования, как и к микрофонному усилителю.

Таким образом, на входе ревербератора электрическая энергия преобразуется в механическую, а на выходе механическая энергия снова преобразуется в электрическую, но с задержкой во времени, равной времени пробега крутильной волны по пружине. При этом не вся механическая энергия пружины сразу преобразуется в электрическую.

Когда волна подходит к концу пружины, то часть ее энергии отдается выходному преобразователю, а часть, отражаясь от конца, возвращается к началу пружины, откуда снова отражается еще раз, и т. д. Таким образом, выходной преобразователь получает многократно отраженные колебания с затухающей амплитудой. Так как пружина закреплена свободно, то колебания постепенно затухают в основном за счет потерь в пружине.

Процесс затухания колебаний продолжается довольно долго (около 2 *сек*), что и создает на выходе ревербератора последова-

тельность затухающих импульсов от поданного на вход сигнала. Это время затуханий механических колебаний и определяет время реверберации пружинного ревербератора. В процессе работы ревербератора время реверберации не регулируется, что является одним из основных недостатков этой системы.

Для уплотнения спектра затухающих колебаний и для получения равномерной частотной характеристики устанавливают несколько параллельно расположенных пружин, отличающихся своими параметрами. Обычно в ревербераторе применяют две пружины. Роторы этих пружин размещают между полюсными наконечниками магнитопровода друг над другом.

Размеры и материал пружин выбирают так, чтобы задержка в них не превышала 50 *мсек*. Так, например, в одной пружине сигнал задерживается на 29 *мсек*, а в другой на 37 *мсек*. Выбирают и другие задержки — 30 и 35 *мсек*.

Для получения таких задержек пружину свивают из проволоки длиной около 4 *м* и диаметром 0,25—0,3 *мм*. Общая длина пружины от 36 до 40 *см* при наружном диаметре около 4 *мм*. Полоса пропускания пружинного ревербератора определяется главным образом механическими характеристиками аппарата.

Низшая частота определяется частотой механического резонанса системы ферритовый ротор — поддерживающая проволочка, которая обычно лежит в пределах 70—100 *гц*.

Верхняя частота передачи в пружине определяется толщиной проволоки, радиусом намотки и плотностью материала пружины. Эту частоту можно найти по формуле

$$f = \frac{a}{4\pi' R^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \text{ гц},$$

где a — радиус поперечного сечения проволоки;
R — радиус витка пружины;
ρ — плотность материала пружины;
E — модуль упругости Юнга.

Увеличить верхнюю частоту пропускания можно путем увеличения отношения a/R^2, при этом время задержки уменьшится во столько же раз. Таким образом, для получения той же задержки длина пружины должна быть увеличена пропорционально увеличению f. Это объясняет тот факт, что верхняя частота пружинного ревербератора не превышает, как правило, 5 000 *гц*. При этом ревербератор представляет собой компактный прибор, размеры которого определяются главным образом длиной пружин, т. е. 40×10×10 *см*. Желание сделать ревербератор меньших размеров влечет за собой сужение рабочего диапазона частот.

Таким образом, частотная характеристика пружинного ревербератора в общем случае лежит в области 70—5 000 *гц*. Скорость затухания колебаний, многократно отраженных от концов пружины, зависит от частоты. Чем выше частота колебаний, тем больше скорость затухания. Вследствие этого частотная характеристика времени реверберации имеет спад на высоких частотах.

Несмотря на использование крутильных колебаний, в ревербераторе может быть сравнительно высокий уровень помех при механических сотрясениях; причина тому — механический резонанс системы, лежащий на низких частотах.

Для уменьшения влияния паразитных колебаний каждую пружину составляют из двух противоположно намотанных половин, жестко связанных между собой. Одна часть пружины компенсирует колебания другой при механических сотрясениях и предотвращает усталостное раскручивание. Кроме того, все устройство подвешивается в защитном коробе на амортизационных пружинах.

Сотрудником НИКФИ Ю. А. Индлиным предложена новая конструкция трехпружинного ревербератора со значительно улучшенной характеристикой. В этой конструкции вместо ферритовых роторов используют катушки из очень тонкого провода, укрепленные на пластинках из бериллиевой бронзы, размещенных между полюсными наконечниками сильного постоянного магнита. Эти пластинки с катушками крепятся так же, как и роторы, с помощью тонкой немагнитной проволочки с одной стороны к опорам, с другой — к пружинам.

Ток звуковой частоты, проходя по катушке входного возбудителя, взаимодействует с магнитным полем магнита и вызывает крутильные колебания в пружине. Под действием этих колебаний катушка выходного преобразователя начинает поворачиваться в магнитном поле постоянного магнита и в ней наводится э. д. с. Обмотки всех трех катушек со стороны возбудителя и со стороны датчика соединены последовательно. Процесс затухания идет так же, как и в описанном ревербераторе.

Три пружины создают уплотнение спектра реверберационного процесса. Каждая пружина состоит из двух половин, намотанных в противоположные стороны; общая длина каждой пружины 40 *см* при разной плотности намотки.

Со стороны возбудителя опорные проволочки пропущены через плоские резиновые амортизаторы, плотно стянутые между собой, и прикреплены к опоре. Со стороны датчика проволочки укреплены в немагнитной опоре, прикрепленной к боковой поверхности магнита.

При такой конструкции пружинных систем ревербератора механический резонанс этих систем лежит в области высоких частот — от 3 200 до 3 500 *гц*. Это позволило сделать ревербератор не чувствительным к механическим сотрясениям. В данном пружинном ревербераторе регулирование времени реверберации осуществляется с помощью демпфера, представляющего собой полоску пористой резины, укрепленную на полюсных наконечниках постоянного магнита.

Сила трения между витками пружины и материалом демпфера превышает усилие, приложенное к пружинам во время работы. В противном случае проскальзывание витков относительно демпфера вызывало бы нежелательные шумы и искажения. Изменяя степень демпфирования, можно менять время искусственной реверберации от 2 до 5,5 *сек*. Однако эти изменения возможны лишь только перед началом работы, а в процессе работы менять демпфирующие прокладки нельзя.

Для использования данного ревербератора в профессиональной аппаратуре плотность сигналов от трех пружин все же недостаточна, поэтому появился вариант совмещения двух трехпружинных ревербераторов в одном аппарате. Шестипружинный ревербератор обладает задержками в пружинных линиях, равными 29, 37, 43, 63, 71 и 77 *мсек*. Данный аппарат дает 65 эхо-сигналов в 1 *сек*, что соответствует временному разрыву между последовательно следующими эхо-сигналами 15 *мсек*. Такая плотность следования эхо-сигналов приближается к плотности отражений звуковых волн в реаль-

ном помещении, при этом характерные недостатки пружинных ревербераторов не прослушиваются.

Этот тип ревербератора был использован в киностудиях при записи фонограмм к кинофильмам и получил хорошие отзывы.

Реверберационный сигнал, созданный пружинным ревербератором, обладает характерным «металлическим» призвуком. Особенно это проявляется при максимальной громкости реверберационного сигнала. Создается впечатление, что в гулком зале ударяют по стальным пластинам. Для устранения этого неприятного явления пружины иногда покрывают тонким слоем меди гальваническим методом.

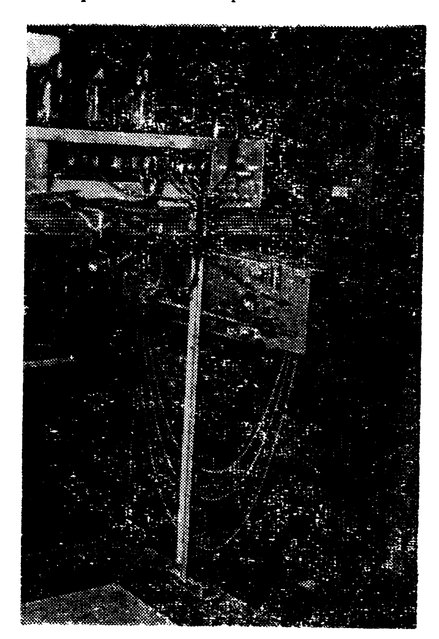


Рис. 32. Общий вид пружинного ревербератора, применяемого в электроорганах.

Пружинный ревербератор впервые был применен как средство задержки звука и изменения тембра в электрооргане фирмы Хаммонд (США).

Тембр звука зависит от ряда факторов, в том числе и от того, как воспроизводится звук: с реверберацией или нет. Роль ревербератора аналогична педали фортепиано, при нажатии которой от струн отходит демпфер. С другой стороны, наличие ревербератора в электромузыкальном инструменте позволяет чередовать прямой звук с реверберирующим. Если в электрооргане установлено два ревербератора, то появляется возможность чередовать звуки с различным временем реверберации. Таким образом, ревербератор позволяет расширить возможности электромузыкального инструмента. На рис. 32 показан трехпружинный ревербератор со свободно провисающими пружинами, установленный в акустическом ящике, входящем в комплект электрооргана.

Для снижения влияния механических сотрясений и для улучшения частотной характеристики в некоторых моделях электрооргана рабочие пружины помещают в масло, а также подвешивают их на дополнительных пружинах.

Отечественная промышленность выпускает несколько типов пружинных ревербераторов, встроенных в радиолы «Минск-65», «Иоланта», «Лира», а также в виде отдельной реверберационной приставки «Эхо».

В стереорадиоле «Минск-65» блок реверберации представляет собой двухкаскадный усилитель выходного преобразователя на транзисторах типа П15А с двухпружинной линией задержки *ПЛЗ*.

Время задержки в пружинах — 35 и 43 *мсек.* Время реверберации не регулируется и равно 2 *сек.*

В ревербераторе применена обычная схема создания крутильных колебаний с помощью электромагнитной системы и ферритовых роторов. Для снижения паразитных колебаний ферритовые роторы подвешены в резиновых амортизационных подушечках, запрессованных в крепежные втулки. Роторы изготовлены из ферритовой массы 1БИ, магнитопроводы — из пластин сплава 50Н толщиной 0,35 *мм.* На каждый магнитопровод надет каркас с катушкой. Катушка входного преобразователя имеет 110 витков провода ПЭВ 0,35; катушка выходного преобразователя имеет 1 500 витков провода ПЭВ 0,08.

Обе пружины навиты из стальной проволоки диаметром 0,3 *мм*, диаметр пружины 4 *мм.* Каждая пружина составлена из двух пружин с разным направлением навивки. Первая пружина состоит из двух пружин длиной 120 и 112 *мм*, а вторая — 102 и 97 *мм.* Принципиальная схема реверберационного блока приведена на рис. 33.

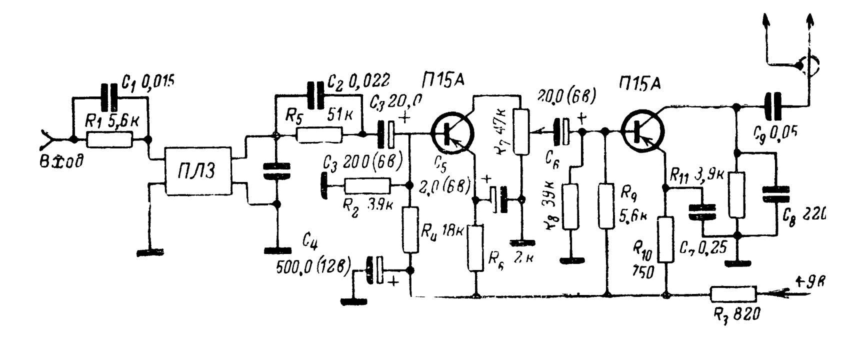


Рис. 33. Принципиальная схема реверберационного блока стереорадиолы «Минск-65».

Сигнал низкой частоты снимается с выходного трансформатора усилителя правого канала радиолы и через корректирующую цепочку $R_1 C_1$ подается в обмотку входного преобразователя. Напряжение, снимаемое с выходного преобразователя, подается на первый каскад транзисторного усилителя, чувствительность которого должна быть не ниже 60 *мв.* На входе второго каскада этого усилителя включен потенциометр R_7, который служит для регулировки коэффициента усиления усилителя блока реверберации. В данном усилителе этот коэффициент составляет 50—100.

Диапазон частот, воспроизводимых реверберационным блоком, 120—4 500 *гц.* причем характеристика имеет большой завал на высоких частотах.

С выхода реверберационного блока сигнал подается на регулятор баланса левого канала блока УНЧ радиолы, который в данном случае выполняет функцию регулятора глубины реверберации. Для подачи большей мощности на вход блока входного преобразователя вторичная обмотка выходного трансформатора правого канала имеет большее число витков, чем вторичная об-

мотка трансформатора левого канала. Для равенства выходных уровней каналов громкоговоритель правого канала подключен к части обмотки своего выходного трансформатора.

При проигрывании стереофонических грампластинок канал реверберации отключается, так как воспроизвести стереосигнал с реверберацией невозможно. Это является недостатком такой схемы включения блока реверберации. При прослушивании радиопередач и проигрывании монофонических пластинок правый канал воспроизводит только прямой звук, а левый только реверберирующий. Предусмотрена схема отключения блока реверберации, тогда на вход правого и левого каналов подается одна программа.

Усилитель и пружинная линия задержки реверберационного блока собраны на одном шасси из дюралюминия размерами 40×6×2 *см*. Шасси укреплено горизонтально с помощью амортизационных пружин в специально изолированном отсеке акустического ящика радиолы. Другие пружинные ревербераторы в отечественных приемниках аналогичны вышеописанному. В частности, в радиоле «Иоланта» использованы блоки реверберационной приставки «Эхо». Сама приставка «Эхо» представляет собой двухламповый усилитель низкой частоты и двухпружинный ревербератор, смонтированный в одном ящике совместно с акустической системой. Приставка предназначена для создания эффекта реверберации и для увеличения выходной мощности любых звуковоспроизводящих устройств (телевизор, магнитофон, радиола, карманный и переносный радиоприемники). Для эффективного прослушивания реверберации подводимая к приставке мощность должна быть в пределах 3—5 *вт*.

В ревербераторе используются крутильные колебания, создаваемые с помощью электромагнитной системы и ферритовых роторов. Принципиально его конструкция не отличается от вышеописанной. Особенностью является выходной трансформатор блока возбуждения.

Задержка во времени для одной пружины 29 *мсек*, для другой — 37 *мсек*. Ревербератор смонтирован на дюралюминиевом шасси, подвешенном на амортизационных пружинах в верхней части футляра. Принципиальная схема приставки показана на рис. 34.

Предварительный усилитель выходного преобразователя собран на половине лампы $Л_1$, оконечный каскад усиления — на лампе $Л_2$. Для питания анодных цепей использован селеновый выпрямитель типа АВС-80-260. Усилитель имеет номинальную выходную мощность 2 *вт*; он нагружен на акустическую систему, состоящую из двух громкоговорителей типа 2ГД-19 или 2ГД-28-80 и 2ГД-28-100.

Время реверберации (1,4 *сек*) не регулируется, но, изменяя уровень громкости реверберирующего сигнала, воспроизводимого одновременно с прямым сигналом, можно менять впечатление о реверберации. При отключении линии задержки приставка работает в режиме усиления прямого звука, входной сигнал при этом подается на правую половину лампы $Л_1$. Диапазон воспроизводимых ревербератором частот 100—2 500 *гц*, а усилителя — 100—8 000 *гц*.

Местоположение реверберационной приставки влияет на восприятие эффекта реверберации. Наилучшее размещение можно подобрать опытным путем, сдвигая приставку вправо, влево или вглубь относительно основного звуковоспроизводящего устройства, добиваясь пространственности звучания. Эффект реверберации,

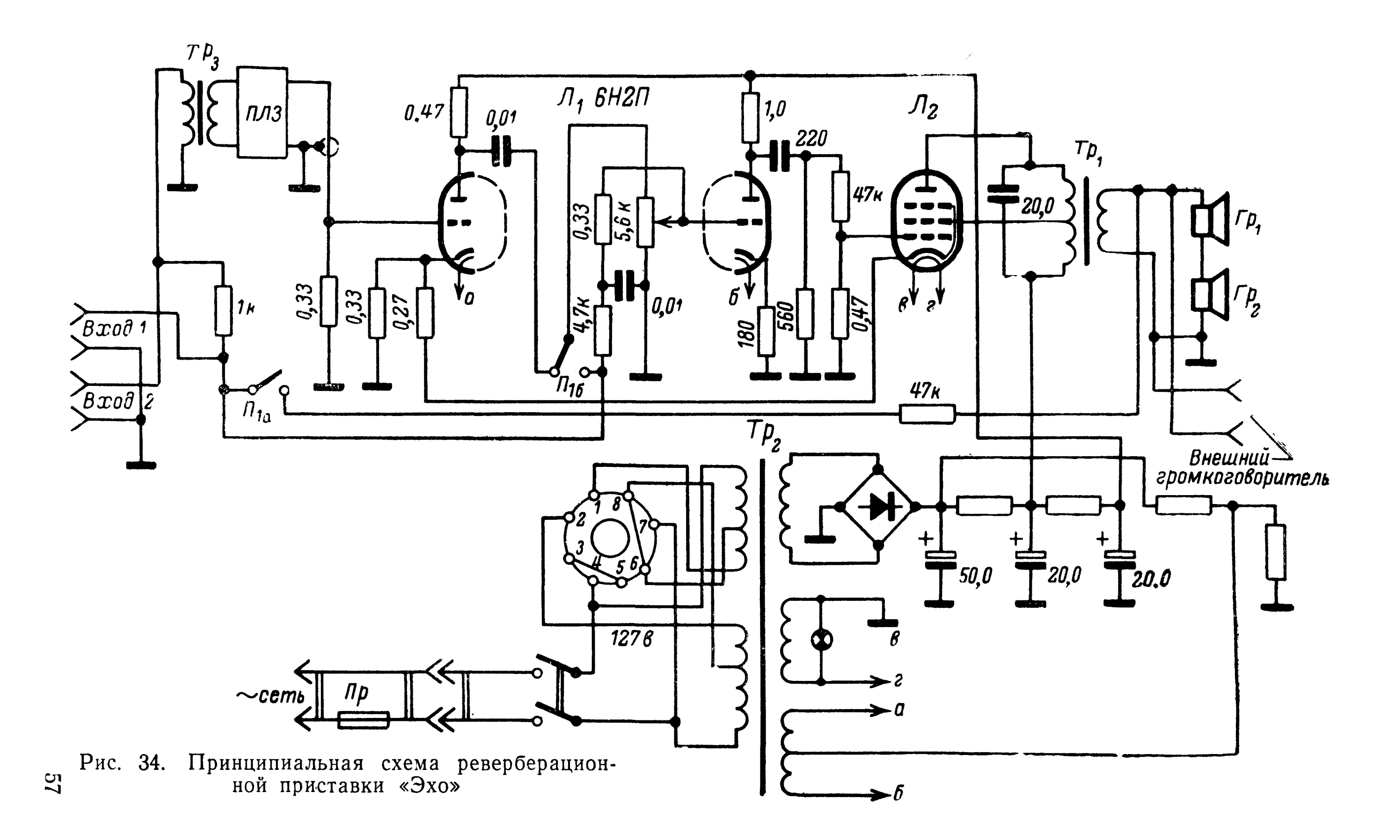


Рис. 34. Принципиальная схема реверберационной приставки «Эхо»

получаемый с помощью пружинного ревербератора, улучшает качество звучания радиолы и приемника, особенно при прослушивании программ симфонической и органной музыки, при этом проявляется наибольший эффект глубины и объемности звучания. При прослушивании речи, джазовой или ритмичной музыки вводить реверберацию надо крайне осторожно, иначе разборчивость речи резко уменьшится, а ритм музыки начнет сбиваться.

ЛЮБИТЕЛЬСКИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРУЖИННЫХ РЕВЕРБЕРАТОРОВ

Ниже предлагается две любительские конструкции — одно- и двухпружинного ревербератора. Наиболее прост по конструкции однопружинный ревербератор с электродинамическим входным преобразователем (возбудитель) и пьезокристаллическим выходным преобразователем (звукосниматель).

В качестве возбудителя можно использовать электромагнитный микрофон (типа ДЭМ-4М) или обычный телефон. Для того, чтобы к микрофону можно было присоединить пружину, требуется незначительная его переделка — удалить мембрану, а иглу якоря согнуть в кольцо. В телефоне пружина припаивается к мембране. Для снижения сопротивления обмотки катушки в телефоне соединяют параллельно. Звукоснимателем может служить пьезокристалл ПЗК-3 (от адаптерной головки УЗ-2) или ПЭЗ-58.

Пружину изготовляют из стальной (рояльной) струны диаметром 0,25—0,4 *мм*. Длина заготовки 17—17,5 *м*. Пружину навивают на стержень диаметром 3—3,5 и длиной 400 *мм*. На одном конце стержня сверлят два отверстия, в которые вставляют конец проволоки. Оправку зажимают в патрон токарного станка так, чтобы из патрона выходил наружу только ее конец длиной 40—50 *мм*. Вращая ручной шпиндель, аккуратно виток к витку туго укладывают провод на оправке. По мере того как оправка будет заполняться, ее выдвигают из патрона. При растяжении пружины на 35—40% от своей длины не должна быть заметна неравномерность навивки («узлы»). Слипание витков также не допускается. Длина навитой пружины около 300 *мм*. Если увеличить длину пружины, то необходимо увеличить соответственно размеры основания ревербератора. Конструкция самого ревербератора ясна из рис. 35, *а*.

На основании *3*, изготовленном из дерева, укрепляют возбудитель *5* и звукосниматель *4*. Пружина *1* крепится к опоре крючком, стержень которого пропущен через резиновую трубку-прокладку (рис. 35,*б*). Эта прокладка необходима для того, чтобы уменьшить влияние механических сотрясений на пружину. Перед установкой пружину желательно обезжирить.

Между возбудителем и звукоснимателем устанавливается специальный демпфер *2*. Прижатый к пружине, он препятствует поперечным и вертикальным паразитным колебаниям в пружине. Демпфер изготовляют из губчатой резины достаточной толщины, чтобы в ней можно было сделать угловой вырез для фиксации положения пружины (рис. 35,*в*).

Кристалл звукоснимателя *4* вертикально закрепляют с помощью клея БФ-2 в Г-образной стойке (рис. 35, *г*), изготовленной из оргстекла или гетинакса. Сам кристалл соединяется с пружиной через латунный хомутик, имеющий заостренный выступ. Выступ

должен плотно входить между витками пружины, воспринимая ее осевые колебания. Хомутик надевается на кристалл и соединяется с ним с помощью клея. Для лучшей изоляции между хомутиком и кристаллом проложена лакоткань. Сам ревербератор крепится к корпусу *6* с помощью пружинных амортизаторов *8*. Корпус устанавливают на резиновые амортизаторы *7*. Чтобы устранить акустическую связь с работающим громкоговорителем, внутреннюю часть корпуса обклеивают тонким фетром, бархатом или другим звукопоглощающим материалом.

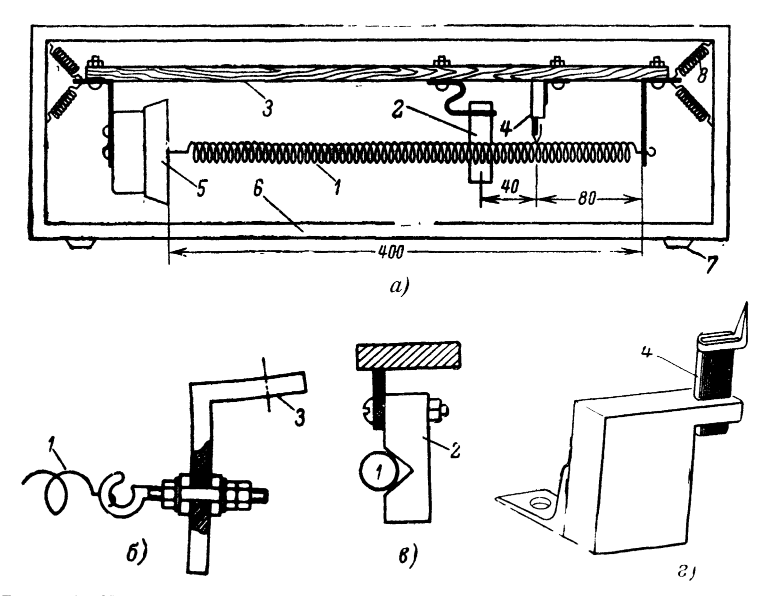


Рис. 35. Любительская конструкция однопружинного ревербератора. *а*—общий вид; *б*—крепление пружины к опоре ревербератора; *в*—размещение пружины в демпфере; *г*—стойка крепления звукоснимателя с хомутиком.

Электронная часть пружинного ревербератора может быть выполнена по различной схеме, но непременным условием любой схемы является соединение выходного преобразующего блока с предварительным усилителем. Дело в том, что затухание в электромеханической линии задержки составляет 55—60 *дб*. Так, например, если подать на вход пружинного ревербератора сигнал с напряжением 4 *в*, то на выходе напряжение этого сигнала будет всего 10 *мв*. Примерная диаграмма уровней канала звукопередачи с включенной в тракт линии электромеханической задержкой (пружинный ревербератор) показана на рис. 36.

Так, на выходе микрофона *1* имеется напряжение 1 *мв*, что соответствует уровню минус 58 *дб* относительно нулевого уровня. Если микрофонный усилитель *2* имеет коэффициент усиления 1 000 (60 *дб*), тогда напряжение на выходе этого усилителя будет рав-

ным 1 *в*. Регулятор громкости *3* установлен в положение, обеспечивающее запас по усилению, равный 20 *дб*. Мощный усилитель *4* непосредственно нагружен на возбудитель линии задержки и имеет коэффициент усиления 30 *дб*. Это соответствует напряжению на входе ревербератора 3,1 *в*. В ревербераторе *5* происходит затухание сигнала на 60 *дб*, что соответствует напряжению на выходе 1,2 *мв*. Предварительный усилитель *6* имеет коэффициент усиления 50 *дб*, и напряжение на его выходе 1 *в*. Регулятор реверберационного сигнала *7* обеспечивает запас по усилению, равный 20 *дб*. Оконечный усилитель *8*, нагруженный на громкоговоритель, имеет коэффициент

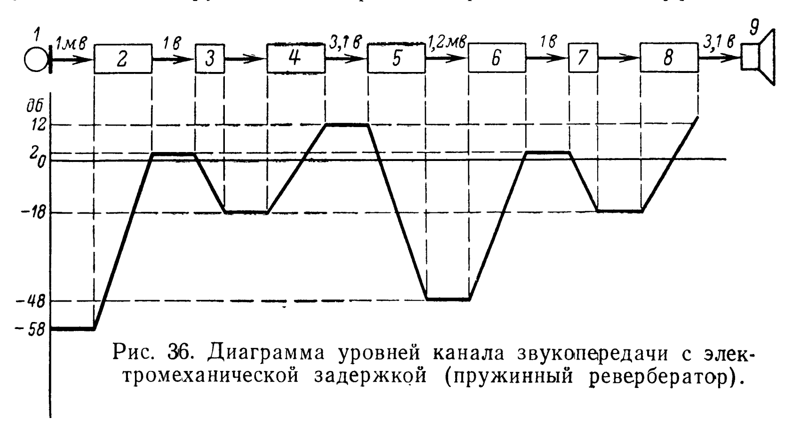


Рис. 36. Диаграмма уровней канала звукопередачи с электромеханической задержкой (пружинный ревербератор).

усиления 30 *дб*, что соответствует напряжению на звуковой катушке громкоговорителя 3,1 *в*. В зависимости от назначения ревербератора и имеющейся усилительной аппаратуры электронная часть линии задержки может быть собрана по различным блок-схемам (рис. 37).

В схеме на рис. 37,*а* на вход блока возбуждения ревербератора подается сигнал с выхода мощного усилителя *УМ* любой звукоусилительной установки. Сигнал с пружинной линии задержки *ПЛЗ* подается на предварительный усилитель *ПУ*. Уровень реверберационного сигнала, подаваемый на оконечный усилитель *ОУ*, регулируется регулятором уровня *РУ*. Оконечный усилитель нагружен на громкоговоритель $Гр_2$, воспроизводящий только реверберационный сигнал. Схема позволяет получить два канала звукопередачи: один прямого звука ($Гр_1$), второй — реверберационного. В этом случае, меняя расположение $Гр_2$, можно найти наилучшее положение для прослушивания.

В схеме на рис. 37,*б* ревербератор имеет собственный усилитель (усилитель блока возбуждения *УБВ*). Входной сигнал подается с любого звуковоспроизводящего устройства, имеющего предварительный усилитель.

Блок-схема, показанная на рис. 37,*в*, имеет ту же структуру, что и на рис. 37,*б*, но прямой сигнал с *УБВ* подается не только на возбудитель линии задержки, но и в смеситель *С*, где смешивается с реверберационным сигналом. Это дает возможность менять глубину реверберации, подбирая уровни прямого и реверберационного сигналов регуляторами уровня $РУ_1$ и $РУ_2$.

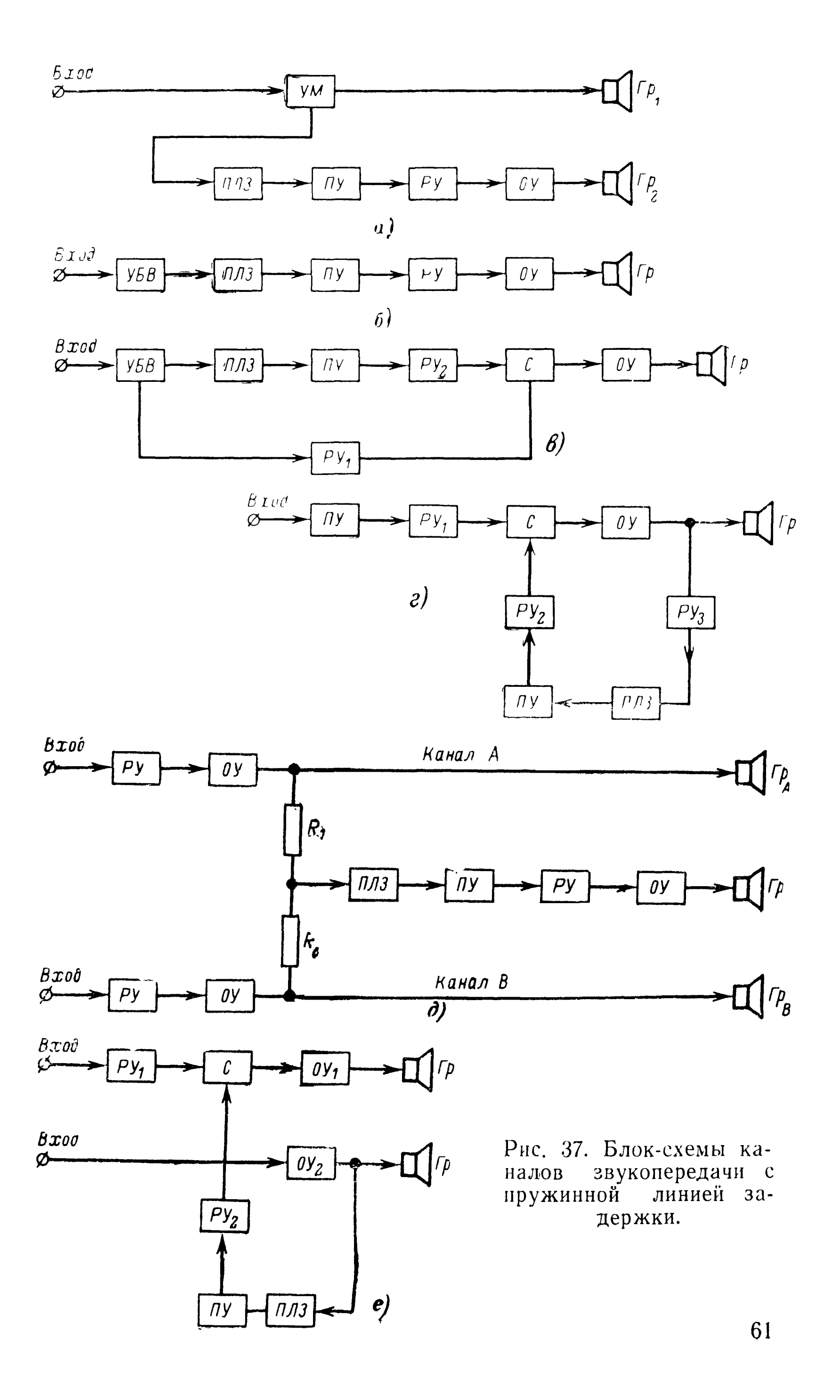


Рис. 37. Блок-схемы каналов звукопередачи с пружинной линией задержки.

Блок-схема, показанная на рис. 37,*г*, имеет только один мощный усилитель. С выхода оконечного усилителя *ОУ* сигнал подается на *ПЛЗ*. Реверберационный сигнал через смеситель *С* подается снова на вход этого же усилителя. При этом положение регуляторов уровня *РУ*$_2$ и *РУ*$_3$ (особенно *РУ*$_2$) крайне критично; из-за небольшого отклонения от оптимального положения эффект реверберации пропадает или в усилителе начинается возбуждение.

По схеме на рис. 37,*д* ревербератор можно включить в двухканальную стереосистему. Выходные сигналы стереоканалов через резисторы R_1 и R_2 подаются на входной блок возбуждения и далее по обычной схеме. Положение громкоговорителя третьего канала нужно подобрать опытным путем.

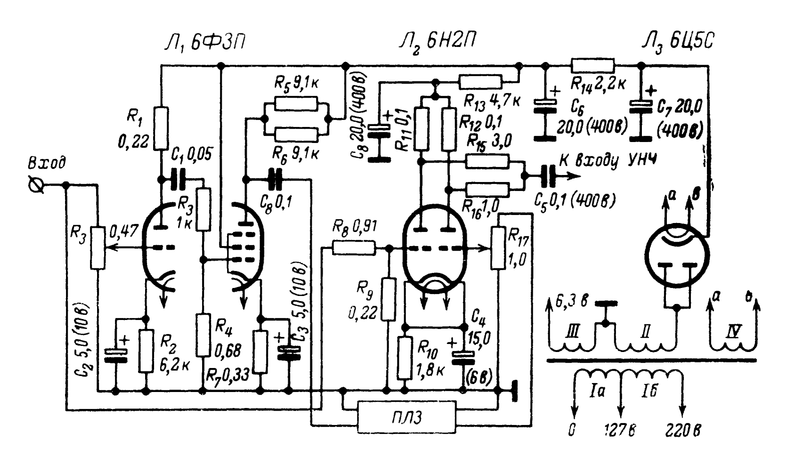


Рис. 38. Принципиальная схема электронной части пружинного ревербератора со смесителем.

По схеме, показанной на рис. 37,*е*, можно включить ревербератор в обычную двухканальную систему воспроизведения; *ПЛЗ* подключают к выходу одного из каналов, а реверберационный сигнал подается через смеситель в другой канал.

Одна из возможных электрических схем ревербератора представлена на рис. 38. Характерной особенностью схемы является смеситель прямого и реверберационного сигналов. В каскаде блока возбуждения работает лампа *Л*$_1$, предварительный каскад собран на правой половине лампы *Л*$_2$. Правильное соотношение прямого и реверберационного сигналов достигается с помощью делителя напряжения R_8, R_9 в цепи сетки левого триода лампы *Л*$_2$ (смесителя), а также подбором резисторов R_{15} R_{16} в анодных цепях обоих триодов этой лампы. С помощью переменного резистора R_{17} производится регулировка длительности послезвучания. Потенциометром R_3 можно менять уровень сигнала на входе блока возбуждения, что позволяет усилить или ослабить эффект реверберации. Питание обеспечивается с выпрямителя, собранного на кенотроне *Л*$_3$. Цепи, соединяющие вход ревербератора с резисторами R_8 и R_9, а также потенциометр R_{17} и кристалл звукоснимателя экранируют. Второй

вывод звукоснимателя соединяют с шасси. Вход ревербератора подключают к источнику сигнала (звукосниматель проигрывателя, выход головки воспроизведения магнитофона, резистор нагрузки детектора приемника, адаптер электрогитары), а выход — к регулятору громкости УНЧ.

Схема усилителя блока возбуждения на транзисторах показана на рис. 39,*а*. Особенностью схемы являются согласующий трансформатор между первым и вторым каскадами усилителя и выходной трансформатор, нагруженный на возбудитель линии задержки.

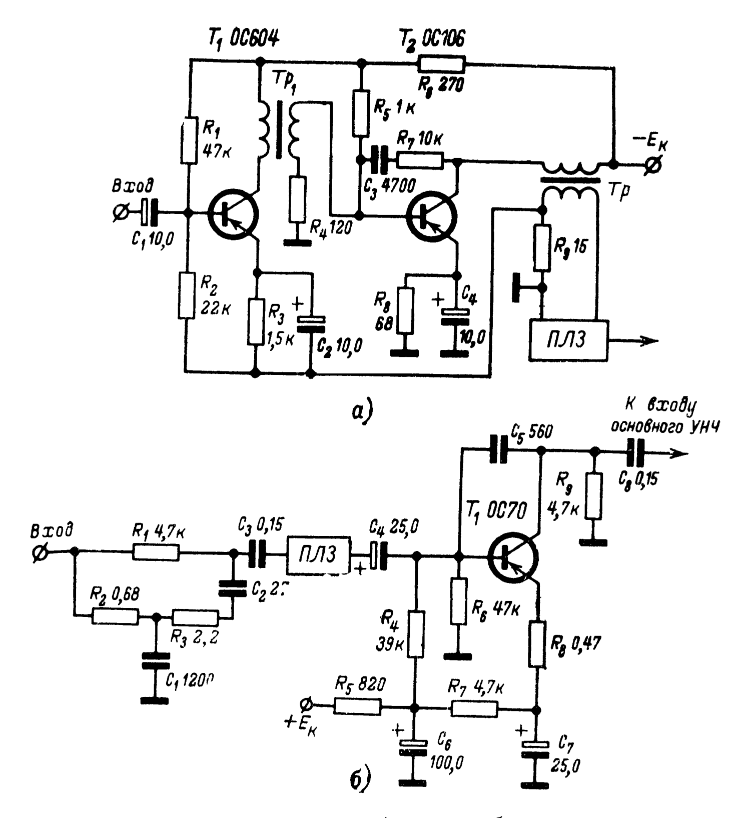


Рис. 39. Принципиальные схемы блоков возбуждения на транзисторах.

Транзисторная схема предварительного усилителя выходного преобразователя показана на рис. 39,*б*. Эти схемы используются в звукоусилительных системах при двух или трех каналах воспроизведения, когда реверберационный канал является не основным.

На схеме, представленной на рис. 40, усилитель блока возбуждения и предварительный усилитель также собраны на транзисторах. Сигнал звуковой частоты подается через резистор R_1 на вход

усилителя прямого сигнала (канал A), собранного на транзисторах T_1, T_2 и T_3. К коллекторной цепи транзистора T_3 подключен входной преобразователь (телефон), а с коллектора транзистора T_2 через переходной конденсатор C_5 снимается прямой сигнал, уровень которого на выходе A регулируется переменным резистором R_{11}. Сигнал со звукоснимателя подается на вход эмиттерного повторителя, выполненного на транзисторе T_4. Конструктивно транзистор T_4 крепится на стойке звукоснимателя. Выводы кристалла вместе с выводами резистора R_{12} припаивают к коллекторному и базовому выводам этого транзистора. С коллекторной нагрузки транзистора T_5 реверберационный сигнал через переходной конденсатор C_7 поступает на переменный резистор R_{17} и далее на выход $Б$. Прямой и реверберационный синалы через развязывающие резисторы R_{18} и R_{19} подаются на выход $A+Б$ смешанных сигналов.

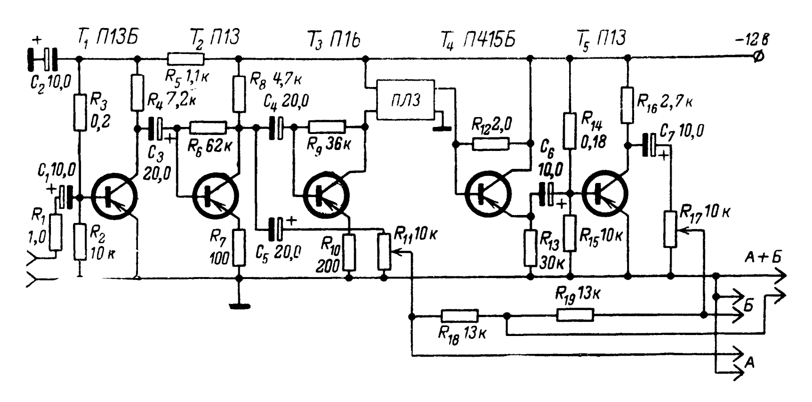


Рис. 40. Принципиальная схема усилителя блока возбуждения и предварительного усилителя на транзисторах.

Выходы ревербератора обеспечивают напряжение сигнала, достаточное для включения его в гнезда «звукосниматель» УНЧ приемников, магнитофонов и другой аппаратуры. К выходам A и $Б$ можно подключить два независимых усилителя или двухканальную стереофоническую систему, а к выходу $A+Б$ дополнительный усилитель УНЧ. Усилитель блока возбуждения и предварительный каскад питаются от источника постоянного тока напряжением 12 *в*, потребляя ток около 9 *ма*. Как и в предыдущих схемах, входные цепи усилителей необходимо экранировать для защиты от различных наводок. На рис. 41 представлена схема усилителя возбуждения и предварительного усилителя, собранного также полностью на транзисторах. Данная схема отличается от предыдущей тем, что выходной каскад УБВ для получения большей выходной мощности (3 *вт*) выполнен по двухтактной схеме с эмиттерным повторителем. Предварительный каскад УБВ — фазоинверсный — собран по схеме с разделенной нагрузкой, для чего в коллекторную и эмиттерную цепи включен согласующий трансформатор.

Налаживание транзисторных усилителей заключается в подборе режимов транзисторов с помощью нагрузочных резисторов. Подбору

подлежит и входной резистор, его сопротивление зависит от источника входного сигнала. Ламповые усилители, как правило, особой настройки не требуют.

После настройки усилителей приступают к налаживанию системы задержки, которое можно производить по слуху при подключении ревербератора. Налаживание линии задержки состоит в подборе степени демпфирования пружины. Можно варьировать расстояние между демпфером и звукоснимателем. Меняя натяжение пружины с помощью крепежной гайки крючка, можно изменить эффект послезвучания.

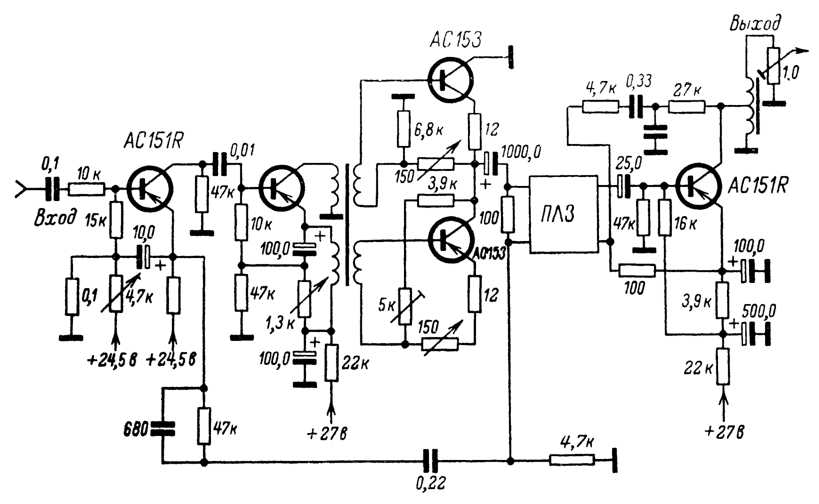


Рис. 41. Принципиальная схема двухтактного усилителя блока возбуждения и предварительного усилителя на транзисторах.

Если в качестве возбудителя использован микрофон ДЭМ-4М, то, подавая сигнал на вход ревербератора, добиваются максимальной громкости, вращая регулировочный винт. Затем проверяют, не задевает ли якорь полюсных наконечников магнитной системы микрофона.

В любительской конструкции двухпружинного ревербератора используются крутильные колебания. Надо предупредить, что изготовление предлагаемой конструкции требует особой аккуратности из-за малых размеров некоторых деталей. Наиболее сложным в этой конструкции является, пожалуй, изготовление электромагнитов и ферритовых роторов.

Магнитопроводы, размеры которых указаны на рис. 42,*а*, *б*, *в*, желательно набирать из листового пермаллоя марки 45Н или 79НМ (девять листов толщиною 0,35 *мм*). Лучшие показатели у магнитопровода, собранного на пермаллое 79НМ. Листы пермаллоя стягиваются с помощью специальной скобы и прикрепляются к опоре из латунной пластинки толщиной 1 *мм* (рис. 42,*д* и *е*).

При изготовлении магнитопровода не обязательно строго придерживаться указанных размеров, можно воспользоваться и готовым сердечником с размерами, близкими к указанным.

Рогоры изготовляются из магнитнотвердого материала, применяемого для постоянных магнитов. Лучшей формой следует считать цилиндрическую, но можно использовать и прямоугольные магниты.

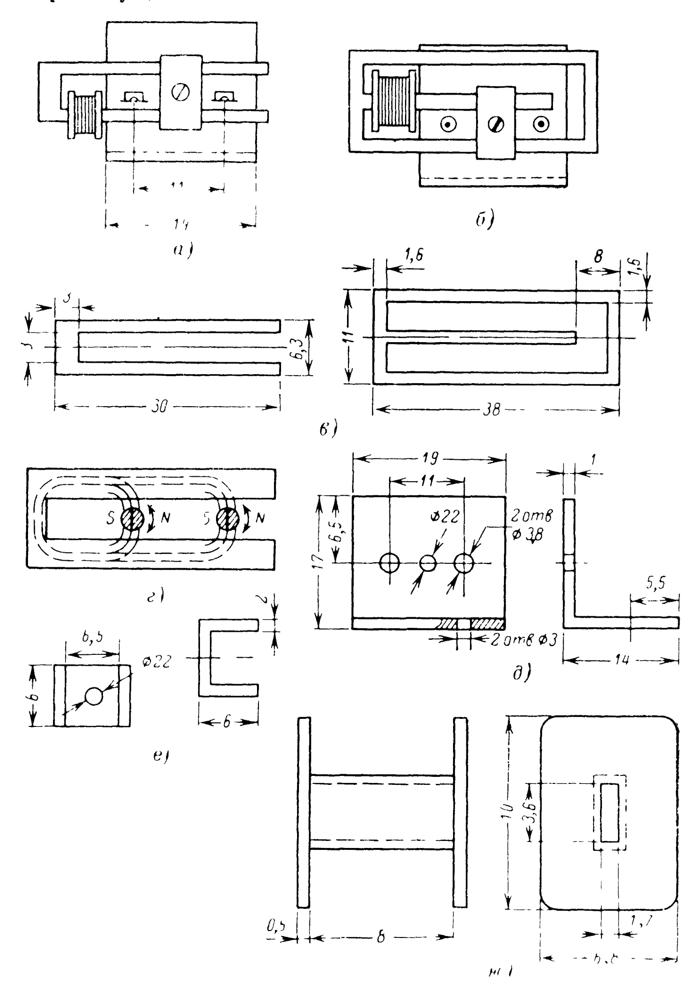


Рис. 42. Блок возбуждения и блок датчика.

а—блок возбуждения в сборе (ферриты прямоугольной формы); *б*—блок датчика в сборке (ферриты цилиндрической формы); *в*—магнитопроводы соответственно для каждого блока; *г*—действие магнитного потока на ферритовые роторы; *д*—опора латунная; *е*—скоба латунная; *ж*—каркас катушки.

При подгонке ротора до нужных размеров необходимо осторожно подходить к выбору способа механической обработки магнита. Наиболее «безопасным» способом с точки зрения возможного снижения магнитных свойств материала является шлифовка на металлическом круге с применением мягких абразивных порошков. Механическое усилие при шлифовке должно быть минимальным. Магнитнотвердые материалы можно обрабатывать также и с помощью ультразвука. Соединение ротора с пружинами и поддерживающими проволочками может быть выполнено различными способами (рис. 43).

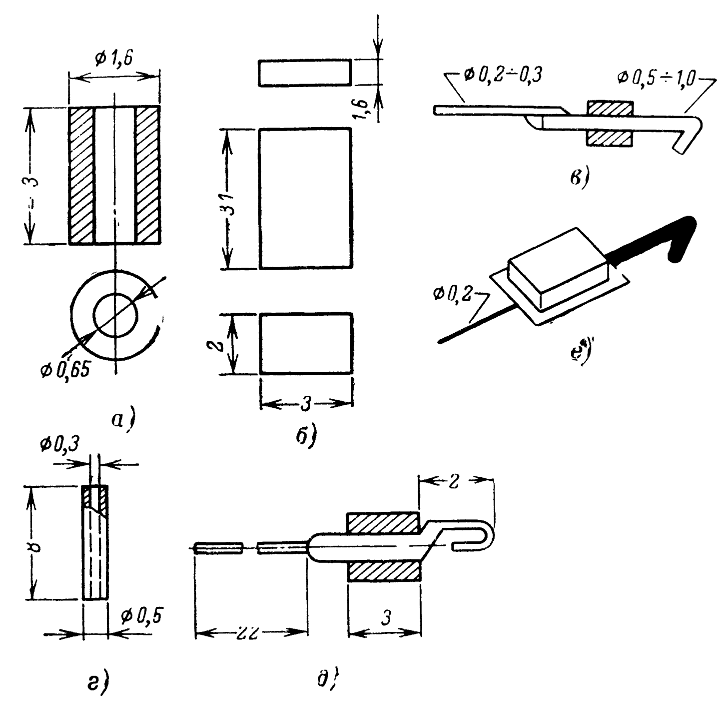


Рис. 43. Цилиндрический и прямоугольный роторы датчиков (*а* и *б*), крепление (*в*) цилиндрического ротора с помощью медной трубки (*г*), медной проволоки (*д*) и крепление прямоугольного ротора (*е*).

Ротор цилиндрической формы крепят с помощью алюминиевой трубочки или медного провода, пропущенного через ротор. Ротор прямоугольной формы крепят на латунной пластинке толщиной 0,5 *мм* с помощью клея БФ. Вообще соединять различные детали можно с помощью указанного клея, но наиболее прочное склеивание достигается эпоксидной смолой.

Поддерживающие проволочки желательно выполнять из фосфористой бронзы диаметром 0,2 *мм,* но можно воспользоваться и дру-

гими материалами. Проволочки должны быть не только легкими, тонкими и прочными, но, кроме того, они должны обладать достаточной эластичностью в направлении закрутки пружины. Крепление поддерживающих проволочек в опорах можно осуществить с помощью крючков с резьбой, пропущенных через резиновые демпферы, установленные в опорах. Каркасы для катушек изготовляют из акрилового или бакелитового листа. Размеры каркаса должны соответствовать размерам сердечника (рис. 42,*ж*).

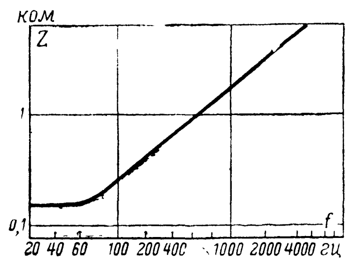


Рис. 44. Частотная характеристика выходного преобразователя.

Количество витков обмотки блока возбудителя определяется мощностью выходного трансформатора оконечного усилителя, к которому предполагается подключать ревербератор, а также системой воспроизведения — монофонической или стереофонической.

При монофонической системе наматывают одну катушку из 130 витков проводом ПЭЛ 0,13. Сопротивление катушки постоянному току должно быть 2,5 *ом*. Для того чтобы в диапазоне высоких частот поддерживать постоянное значение тока, протекающего по обмотке катушки, в ее цепь включают корректирующую цепочку *RC*.

При стереофонической системе воспроизведения можно изготовить две одинаковые катушки и установить их на магнитопроводе, но можно намотать на один каркас две катушки, укладывая одновременно два провода. Каркас катушки, при этом должен быть увеличен. Каждая обмотка подключается к своему каналу. Как и при монофонической системе, в каждую цепь нужно включить корректирующую цепочку *RC*.

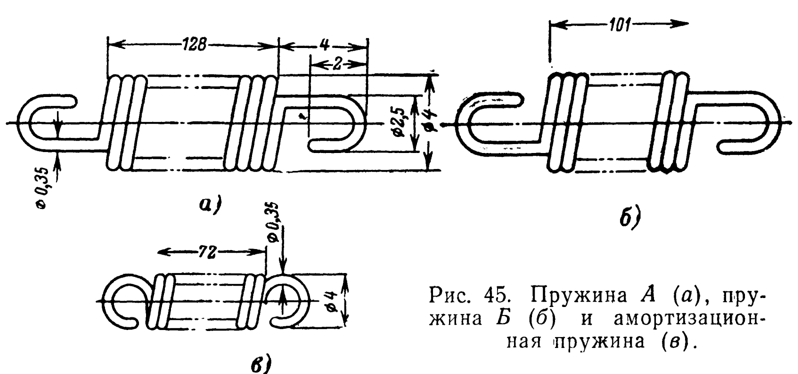


Рис. 45. Пружина *А* (*а*), пружина *Б* (*б*) и амортизационная пружина (*в*).

Обмотка выходного преобразователя имеет 1 800 витков провода ПЭЛ 0,06 (сопротивление постоянному току 170 *ом*). На рис. 44 представлена зависимость полного сопротивления катушки выходного преобразователя от частоты (частотная характеристика).

Пружины изготовляют способом, указанным выше, из рояльной струны диаметром 0,35 *мм*. Каждая пружина составлена из двух половин, одна половина намотана в левую сторону, другая — в правую. Количество витков в половине *А* пружины 360, в половине *Б* 280. Эти половины каждой пружины можно соединять между собой с помощью металлической скобы. Количество витков, а также размеры пружин могут несколько отличаться от указанных на рис. 45.

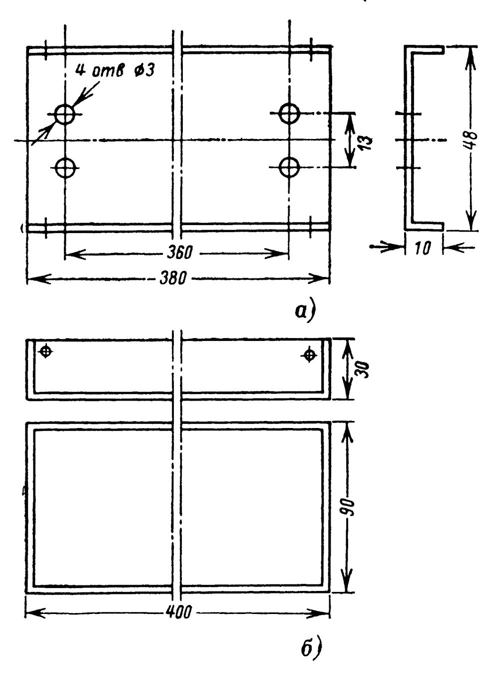


Рис. 46. Шасси (*а*) и защитный кожух (*б*).

Шасси изготовлено из легко обрабатываемого материала, например алюминия. Эти шасси устанавливают внутри защитного кожуха на четырех амортизационных пружинах (рис. 45,*в*), изготовленных из того же материала, что и пружины линии задержки. Чтобы исключить возможное воздействие внешних магнитных полей на магнитную систему ревербератора, кожух изготовляют из листовой нержавеющей стали толщиной 1,2 *мм*. Размеры шасси и кожуха приведены на рис. 46.

При настройке ревербератора желательно использовать звуковой генератор, низкочастотный осциллограф и ламповый вольтметр. Изменяя частоту синусоидальных колебаний генератора, можно наблюдать форму сигнала на осциллографе, подключенном к выходу ревербератора. Частоту развертки удобнее выбрать такую, чтобы на экране помещалось два — три периода синусоиды с максимальной амплитудой. Если имеются искажения синусоиды, нужно попытаться

их устранить, регулируя натяжение пружин или изменяя степень демпфирования и, самое главное, проверяя правильность крепления роторов.

Кроме этого, изменяя частоту синусоидальных колебаний, можно снять с помощью лампового вольтметра частотную характеристику ревербератора (с каскада предварительного усиления.) Частотная характеристика в диапазоне от 200 до 3 500 *гц* должна быть почти горизонтальной. Чувствительность и частотная характеристика зависят от веса деталей, от жесткости подвеса роторов и пружин, от напряженности магнитного поля магнитов датчиков и от степени натяжения пружин. В свою очередь индукция магнитного поля зависит от качественных характеристик обмотки и от материала магнитопровода. При плохой частотной характеристике и недостаточной чувствительности в первую очередь необходимо обращать внимание именно на эти факторы. При слишкой большой мощности на входе, а также для того, чтобы не нарушалось согласование входных сопротивлений последовательно с корректирующей цепочкой (лампой на 6,3 *в*), в каждую обмотку L (при стереоварианте) включается резистор R в несколько ом (рис. 47).

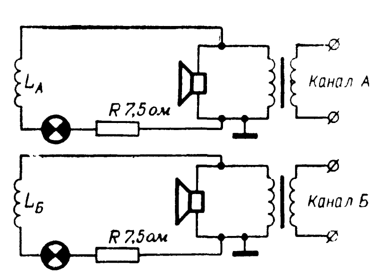


Рис. 47. Схема включения катушки входного преобразователя.

Время искусственной реверберации в данном ревербераторе приблизительно 1,2—1,4 *сек*. Изменения времени реверберации можно добиться, изменяя степень натяжения пружин или вставляя мягкую резину (поролон) для демпфирования непосредственно в пружину.

При конструировании пружинного ревербератора представляется широкое поле для различных экспериментов. Так, например, изменяя диаметр самих пружин и число витков, можно найти наилучший режим работы описанных ревербераторов. Применяя пружину, имеющую цилиндрическую форму в середине и сужающуюся по конусу к концам, можно регулировать время задержки в зависимости от изменения диаметра пружины. Это даст возможность получить желаемую частотную характеристику процесса реверберации.

Обычно звучание музыки в легковой автомашине получается приглушенным из-за небольших размеров салона и большой звукопоглощающей способности мягкой обивки и пассажиров. Улучшение звучания может быть достигнуто с помощью пружинного ревербератора. В этом случае усилитель низкой частоты должен иметь два различных каскада усиления. К одному присоединяют громкоговоритель прямого звука, расположенный на приборном щитке автомашины, а также и вход ревербератора. На вход другого каскада мощности подается реверберирующий сигнал с предварительного усилителя ревербератора.

Особенность автомобильного ревербератора заключается в том, что вибрация и сотрясения создают большие искажения. Поэтому в этом случае применяют специальную систему подвеса пружинного ревербератора. В частности, наилучшей системой является ревербе-

ратор, у которого механический резонанс подвески поднят на высокие частоты (система Индлина).

Ревербератор, смонтированный на шасси, заключают в корпус из пенопласта и подвешивают на четырех пружинах в металлический кожух. Амортизационные пружины растягивают и закрепляют внутри кожуха. Внутри металлический кожух обклеивают поролоном так, чтобы при сильных сотрясениях корпус ревербератора не касался стенок кожуха. В кожухе размещают также и предварительный усилитель, собранный на транзисторах. Выход этого усилителя подключают к оконечному усилителю, работающему на громкоговоритель, расположенный в заднем отсеке салона автомашины. Такое расположение громкоговорителя сзади слушателя создает объемное звучание.

ДРУГИЕ СИСТЕМЫ МЕХАНИЧЕСКИХ РЕВЕРБЕРАТОРОВ

Определенный интерес может представить для радиолюбителей система механического ревербератора, разработанная французской фирмой «Аудакс». В данной системе также применены спиральные пружины.

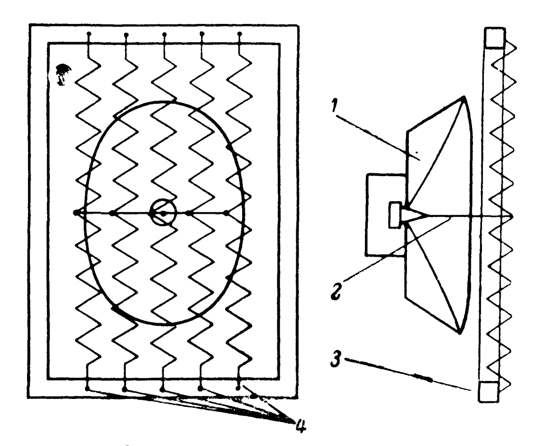


Рис. 48. Механический ревербератор фирмы «Аудакс».

Принцип действия данного устройства заключается в следующем: коническая диафрагма эллиптического громкоговорителя, размеры которого 120×190 *см*, жестко связана с рядом пружин (5—8 шт.) (рис. 48). Спиральные пружины *4* натянуты на раме *3*, расположенной параллельно выходному сечению диффузора *1*, и соединены между собой в центре тонким стержнем *2*. Диаметр каждой пружины около 15 *мм*, длина 35—40 *см*. Громкоговоритель подключают к оконечному усилителю звукоусилительной установки. При работе громкоговорителя колебания звуковой частоты передаются через коническую диафрагму пружинам. Пружины начинают коле-

баться и передавать звуковой катушке громкоговорителя запасенную механическую энергию. Колебания постепенно затухают, тем самым создавая эффект послезвучания. Время реверберации определяется размерами и натяжением пружин, приблизительно оно равно 2 *сек*. Это время можно менять, зажимая отдельные пружины мягким демпфером (поролоном, губчатой резиной, фетром).

Изменяя электрическую мощность, подводимую к катушке громкоговорителя, можно также менять время реверберации.

Чтобы привести пружины в колебательное движение, необходимо создать дополнительное усилие, действующее на звуковую катушку. Это достигается подбором материала магнитной системы с большой индукцией в зазоре около 1,7 *тл*.

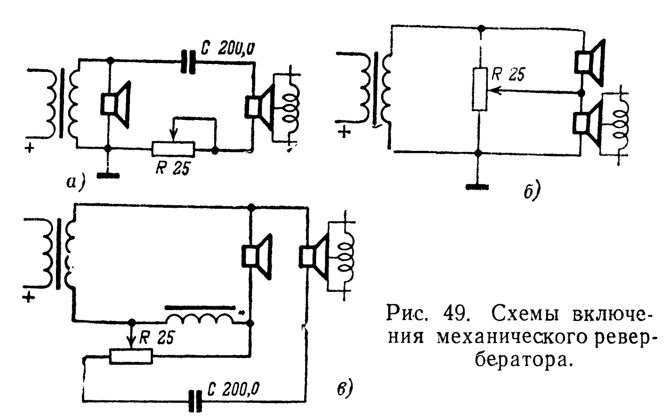


Рис. 49. Схемы включения механического ревербератора.

Несколько различных схем включения реверберационного громкоговорителя представлено на рис. 49. Схема на рис. 49, *а* включает цепь, состоящую из переменного резистора *R* и конденсатора емкостью *С*. С помощью переменного резистора можно менять напряжение, подводимое к реверберационному громкоговорителю, и тем самым менять время реверберации. Конденсатор ограничивает частотную характеристику, срезая частоты до 80 *гц*.

Схема на рис. 49, *б* включает только переменный резистор, с помощью которого можно менять соотношение уровней сигнала на громкоговорителях.

Схема на рис. 49, *в* включает фильтр для разделения частот. Вторичная обмотка выходного трансформатора во всех случаях имеет сопротивление 2,5 *ом*.

К подобным системам относится реверберационный громкоговоритель, показанный на рис. 50, состоящий из звуковой катушки *1*, пружины *2* и механо-акустического преобразователя-диффузора *3*. Пружина одним концом присоединена к звуковой катушке, а другим к диффузору, и передает колебания от звуковой катушки диффузору с задержкой во времени. Механо-акустический преобразователь имеет меньшее механическое сопротивление, чем сопротивление пружины, благодаря чему в диффузоре происходит отражение колебаний.

Интересно отметить также некоторые способы получения эффекта реверберации, не подходящие ни к одному из описанных вы-

ше типов. Так, например, при воспроизведении грампластинок можно установить в корпусе тонарма *1* (рис. 51) не один пьезоэлемент а два—один за другим. Первый пьезоэлемент *2* укрепляют неподвижно в передней части тонарма, за ним устанавливают на специальных направляющих *6* второй пьезоэлемент *3* так, чтобы иглы *7* находились возможно ближе друг к другу. На верхнюю часть второго элемента клеем БФ-2 наклеивают пластмассовую пластинку *4* с накаткой. Таким образом, с помощью зубчатого цилиндра *5* этот элемент можно перемещать по направляющим относительно неподвижного элемента. Иглы этих элементов устанавливают на одной оси и на одном уровне, так чтобы при опускании тонарма иглы одновременно касались грампластинки. Сигналы с обоих пьезоэлементов подаются на независимые усилительные каскады, причем в каскаде подвижного пьезоэлемента устанавливают регулятор уровня. С помощью этого регулятора подбирают необходимое соотношение между основным и запаздывающим сигналами.

Рис. 50. Реверберационный громкоговоритель.

Рис. 51. Адаптерная головка проигрывателя с двумя пьезокристаллическими звукоснимателями.

Линейная скорость перемещения звуковой канавки относительно иглы при стандартных скоростях движения вращения грампластинки уменьшается с уменьшением числа оборотов. Чтобы получить необходимое время задержки между основным и запаздывающим сигналами, расстояние между иглами с уменьшением скорости вращения должно также уменьшаться.

С другой стороны, линейная скорость движения звуковой канавки уменьшается от начала записи к концу (от края диска пластинки к ее центру). Если на одной стороне пластинки записано несколько вещей, то в зависимости от местоположения записи расстояние между иглами также выбирается различным: чем ближе запись к центру, тем меньше расстояние. Конечно, это расстояние выбирают и в зависимости от характера музыкального произведения. Полного эффекта реверберации при данной системе получить не удается, но качество звучания для отдельных музыкальных произведений получается лучше, чем при прослушивании обычным способом.

Этот способ пригоден при выборочной записи с грампластинки на магнитную ленту, когда подбор различного расстояния между иглами для каждого произведения оправдывается хорошим качеством записи на ленту.

При прослушивании музыки в жилой комнате затухание звуковых волн происходит сравнительно быстро из-за небольших размеров помещения и, как правило, большого количества звукопоглощающего материала.

Если принять скорость звука 340 *м/сек*, а расстояние между стенами 5 *м*, то звуковая волна, отразившись от стены, возвратится в исходную точку за 0,03 *сек* (30 *мсек*). Но не только временной интервал имеет значение для реверберации, очень важна также и сила отраженного звука. В данном случае отражения происходят с большим затуханием. Как выше было сказано, эффект реверберации вызывается в основном определенными группами частот. Таким образом, если каким-либо способом получить усиление этих характерных для восприятия реверберации частот при воспроизведении, то при прослушивании в заглушенной комнате затухание на этих частотах будет происходить значительно дольше, что будет восприниматься как увеличение реверберации.

За рубежом выпускают громкоговорители, имеющие подъем частотной характеристики на частотах около 1 000 *гц*, что и способствует созданию эффекта реверберации. Такие громкоговорители устанавливают в приемниках высшего класса. Их можно включить и выключить независимо от остальных громкоговорителей.

При включении этого громкоговорителя эффект реверберации отчетливо прослушивается и в сочетании с другими регулировками тембра создает объемное звучание.

Глава пятая

АМБИОФОНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

ПРИНЦИПЫ АМБИОФОНИИ

За последнее десятилетие ясно обозначилась тенденция проектировать помещения многоцелевого назначения, предназначенные для проведения заседаний и конференций, постановок оперных и драматических спектаклей, для демонстрации кинофильмов, а также для проведения различных концертов.

Многие из ранее построенных театров и дворцов культуры в городах нашей страны практически используют как помещения многоцелевого назначения. Важнейшим качественным показателем при этом являются акустические особенности зала. Получение хорошей акустики в залах осложняется тем, что для прослушивания речи и музыки требуются существенно различные акустические режимы. Ранее упоминалось, что для того, чтобы речь звучала разборчиво, время реверберации в зале должно быть мало. Для полноценного звучания музыки требуются значительно более продолжительное время реверберации и высокая степень диффузности звукового поля в помещении. Поэтому одной из основных проблем

в таких залах является создание средств оперативного управления акустикой, обеспечивающей получение оптимальных условий для различных программ.

Для звукозаписи и в радиовещании для получения эффекта «гулкости» к основному сигналу добавляют реверберирующий сигнал, получаемый искусственно. Искусственная реверберация не вполне равноценна исполнению в «гулком» помещении, потому что исполнитель, не ощущая увеличения гулкости помещения, лишен возможности корректировать свое исполнение в соответствии с увеличением времени реверберации. Уже было сказано, что с помощью различных механических устройств (вращающиеся колонны, передвижные щиты и др.), изменяющих поглощение и рассеяние звука в помещении, можно изменять гулкость, но эффективность подобных систем невелика.

Все эти задачи могут быть решены с помощью специальной электроакустической установки, включающей в себя микрофонное устройство, ревербератор и распределенную по залу систему громкоговорителей. Такая установка носит название *амбиофонической.*

Амбиофоническая система позволяет оперативно и в широких пределах регулировать время и частотную характеристику реверберации в помещении, а также воздействовать на диффузность звукового поля. Особенность амбиофонической системы заключается в том, что примешивание искусственно созданного реверберирующего сигнала к основному осуществляется не в электрическом канале звукопередачи, а непосредственно в первичном помещении, что позволяет создать необходимый акустический оптимум не только для передачи звука по каналам записи и вещания, но и для исполнителей, находящихся в этом помещении.

Для увеличения гулкости помещения в амбиофонических системах используется принцип компенсации звукопоглощения с помощью системы источников запаздывающих сигналов. Время естественной реверберации в таких залах выбирают минимальным, соответствующим оптимуму для речи, а оптимальные условия для слушания музыки создаются за счет работы амбиофонической системы.

Эту же систему можно с успехом применять в очень больших залах и аудиториях для усиления звука. Как известно, в помещениях, имеющих обычную распределенную систему звукоусиления, наблюдается неприятное для слуха нарушение слитности звучания. Это происходит из-за того, что в зале появляются зоны, где разность во времени между звуками, приходящими со сцены непосредственно от исполнителя и от ближайшего к слушателю громкоговорителя, превышает 50 *мсек* (предел инерционной способности слуха). Подбором соответствующего времени задержки и уровня громкости для каждой группы громкоговорителей можно получить такое звукоусиление, которое будет оптимальным по уровню и четкости для всех удаленных от сцены мест. Таким образом, с помощью амбиофонической установки можно обеспечить хорошие акустические условия для исполнения всех видов.

Впервые амбиофоническая система была применена в 1954 г. для улучшения акустики концертного зала Дома искусств и наук в Гааге.

В СССР первая практическая работа в этой области началась в 1958 г. созданием амбиофонической системы в концертном зале Института им. Гнесиных в Москве. Следует, однако, сказать, что еще в 1940 г. при проектировании Дворца Советов в Москве для

большого зала заседаний предусматривалось введение искусственной реверберации через распределенную систему громкоговорителей.

В настоящее время амбиофонические системы нашли признание как у нас в стране, так и за рубежом. В частности, этой системой оборудованы известные залы Европы: театр «Ла Скала» (Милан), большая аудитория в Брюсселе, оперный театр в Варшаве и др.

За создание звукотехнического комплекса Кремлевского Дворца съездов группе советских специалистов была присуждена Ленинская премия. Важнейшим элементом этого комплекса является амбиофоническая система. Подобной системой оборудован Ташкентский дворец искусства, недавно введенный в строй кино-концертный зал «Октябрьский» в Ленинграде, Дворец целинников в Целинограде и ряд других залов. Строящиеся и проектируемые залы многоцелевого назначения большой вместимости в Киеве, Тбилиси, Баку, Кишиневе, Новосибирске, Алма-Ате и в других городах также будут оборудованы подобными системами.

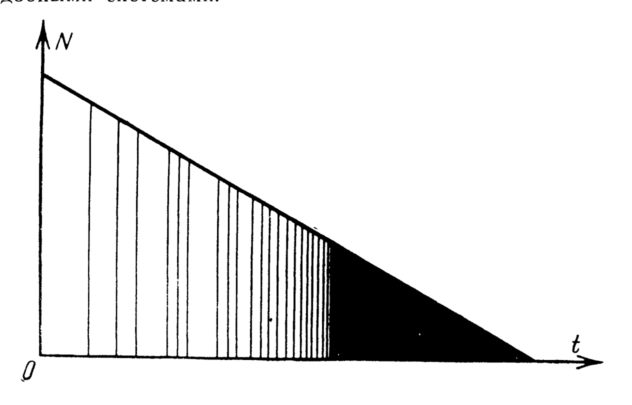


Рис. 52. Временная структура реверберационного сигнала.

Как указывалось ранее, реверберационный процесс состоит из постепенного затухания ряда отраженных сигналов, частота следования которых возрастает по мере убывания амплитуды. Сильно запаздывающие сигналы сливаются в сплошной отзвук (рис. 52). В помещениях малого объема относительное запаздывание первых отражений от разных поверхностей невелико и на слух их разделить нельзя, а в больших помещениях их можно отчетливо различить.

Амбиофоническая система должна создавать сигналы, структура которых была бы близка к структуре естественных отзвуков в помещении. Необходимость разделения во времени первых отраженных сигналов в больших помещениях исключает возможность использования эхо-камер и листовых ревербераторов, поэтому в амбиофонических установках применяют преимущественно магнитные ревербераторы.

Блок-схема амбиофонической системы с ревербератором на магнитной ленте изображена на рис. 53.

Звучание первичных источников — исполнителей той или иной программы — воспринимается микрофоном *М*. Принятый микрофо-

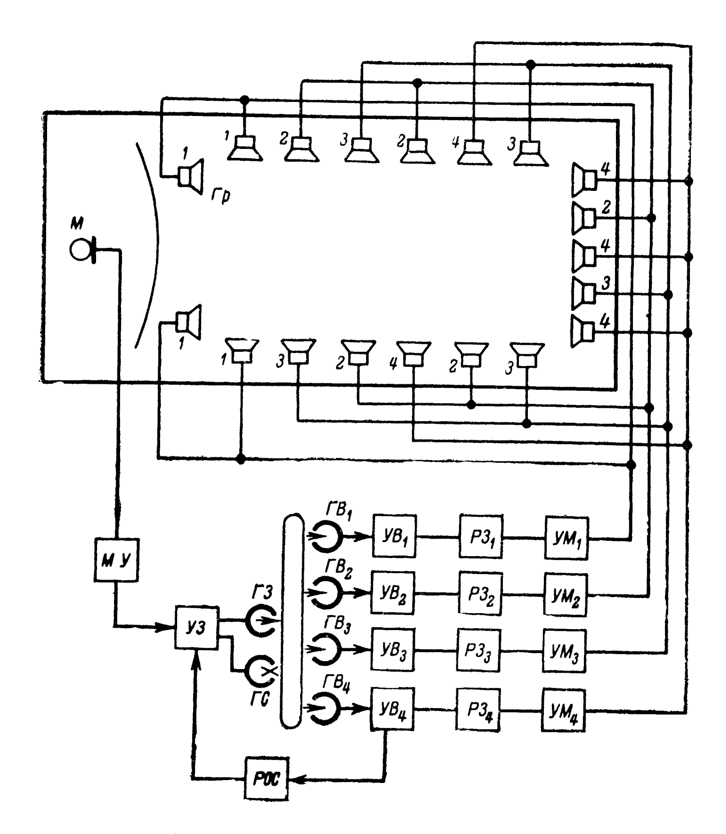


Рис. 53. Блок-схема амбиофонической системы.

ном прямой сигнал усиливается микрофонным усилителем *МУ* и подается на усилитель записи *УЗ* специального ревербератора — амбиофона. В отличие от обычного магнитного ревербератора амбиофон имеет не один, а несколько независимых выходов. Записанный сигнал последовательно воспроизводится головками воспроизведения *ГВ* и через соответствующие усилители воспроизведения *УВ* и регуляторы затухания *РЗ* подается на входы усилителей *УМ*. Сигнал обратной связи отбирается с последней головки воспроизведения и через соответствующий усилитель воспроизведения и регулятор уровня обратной связи *РОС* подается на вход *УЗ* амбиофона. Каждый усилитель мощности нагружен на группу громкоговорителей, размещенных определенным образом в зрительном зале. Группы различаются по времени запаздывания поступивших с амбиофона сигналов. Поскольку микрофон и громкоговорители системы находятся в одном помещении, установка работает с акустической обратной связью. Нормальная работа установки возможна, если акустическая обратная связь мала. В противном случае эта связь приводит к прогрессивному увеличению времени реверберации и система теряет

управляемость значительно раньше перехода в режим самовозбуждения. Для уменьшения акустической обратной связи применяют следующие меры: частотные характеристики сквозных каналов амбиофона имеют спад в области 50—200 *гц*, а громкоговорители системы размещают на максимальном расстоянии от микрофонов, ориентируя оси диаграмм направленности этих громкоговорителей в противоположную сторону от оси чувствительности микрофонов.

В системе применяют микрофоны с острой характеристикой направленности и микрофонные колонки. Микрофонная колонка состоит из четырех или пяти электрически не связанных между собой микрофонов. Такая колонка имеет высокую чувствительность приема в направлении сцены и почти не принимает звук из зала. Обычно микрофонную колонку подвешивают над сценой. При этом все микрофоны работают на отдельные микрофонные усилители микшерского пульта. После усиления и установки соответствующего уровня смешанный сигнал от всех включенных микрофонов подают на вход амбиофона. Вообще микрофоны размещают так, чтобы равномерно воспринимать звук от первичных источников, но при этом учитывается различный режим работы амбиофонической системы. Так, для создания оптимума реверберации требуется усиливать звуки, идущие в направлении отражающих поверхностей, т. е. микрофоны амбиофонической системы должны улавливать звуки, идущие в направлении стен и потолка.

При звукоусилении в зале, а также в студиях записи и радиовещания микрофоны должны еще улавливать звуки, идущие в направлении слушателей с учетом направленности самих источников звука. Учитывая, что сценические микрофоны размещены так, что почти не воспринимают дополнительный реверберационный эффект, созданный амбиофонической системой в студиях записи и радиовещания, а также при трансляции программ, в центре помещения подвешивают отдельный микрофон общего плана. Включенный на вход звукозаписывающего или передающего устройства этот микрофон воспринимает действительную акустическую обстановку в зале.

Громкоговорители амбиофонической системы помимо излучения реверберирующего звука должны создавать диффузное поле. Для этого оси диаграмм направленности громкоговорителей развертывают в различных направлениях, чтобы к слушателю приходил прямой звук сразу от нескольких громкоговорителей, находящихся в разных точках помещения. В больших помещениях громкоговорители равномерно распределяют по потолку и свободной площади стен. Если потолок имеет отражающие поверхности, то часть громкоговорителей системы размещают на карнизах, направив их оси на потолок. Обычно это возможно в помещениях среднего и малого размеров. Так, например, установлены громкоговорители амбиофонической системы в сравнительно небольшом зале Народного театра в Париже (Дворец Шайо).

При распределении громкоговорителей по каналам учитывают пространственную структуру отзвука. В различные точки зала звук приходит с различным запаздыванием, а для того, чтобы искусственный отзвук был близок к естественному, необходимо, чтобы время запаздывания естественного и искусственного сигналов было одно и то же. Поэтому громкоговорители амбиофонической системы разбивают на группы для обслуживания определенных зон помещения. Среднее время запаздывания звука от первичных источников в этих зонах соответствует задержкам в каналах амбиофонии, при

этом достигается удовлетворительная имитация естественного отзвука (см. размещение громкоговорителей на рис. 53).

Помеха от запаздывания естественного отзвука ощущается, если время задержки этого отзвука около 50 *мсек* и более. Поэтому интервалы между запаздывающими сигналами в каналах амбиофона выбраны 20—30 *мсек.*

Для работы амбиофонической системы в режиме звукоусиления обычно в головной части зала над сценой и по обеим сторонам портала сцены устанавливаются несколько звуковых колонн. Каждая колонна составлена из нескольких громкоговорителей и предназначена для озвучения определенной зоны зала.

Однако звуковые колонны не могут создать требуемый уровень сигнала во всех зонах, особенно в последних рядах зрительного зала, поэтому отдельные группы громкоговорителей амбиофонической системы работают в режиме звукоусиления, но с определенной временной задержкой (при помощи амбиофона). Время задержки выбрано из расчета пробега «прямого сигнала» от звуковых колонн до слушателя; этим обеспечивается необходимая привязка слухового образа к зрительному. При правильной настройке амбиофонической системы громкоговорители распределенной системы не прослушиваются и локализация источников первичного звука не нарушается.

СТЕРЕО-АМБИОФОНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Метод стереофонической передачи звука известен сравнительно давно и широко используется в радиолюбительской практике. Развитием этого метода. является стерео-амбиофоническая система звукопередачи. Назначение этой новой системы, предложенной радиоспециалистами из Германской Демократической Республики, состоит в том, чтобы в обычных бытовых условиях искусственно создать примерно такую же акустическую обстановку, как и в концертном зале при натуральном прослушивании музыкальной программы.

С помощью стереофонии у слушателя можно создать впечатление о «ширине» и «глубине» звучания воспроизводимых источников звука. Этот случай условно можно сравнить с прослушиванием программы в первых рядах зрительного зала. Кстати, настоящие знатоки музыки никогда не садятся в первые ряды концертного зала, т. е. там, где акустическое отношение очень мало (преобладает прямой звук).

С помощью амбиофонии достигается вовлечение слушателя в акустическую атмосферу зала, из которой ведется передача или запись. Таким образом, у слушателя появляется впечатление о величине и характере зала.

Сущность стерео-амбиофонической системы заключается в том, что на обычную стереоинформацию, передаваемую по двум каналам, накладывается в определенном соотношении по уровню пространственная информация. Эта информация получается от системы микрофонов, размещенных в звуковом поле помещения, созданном в основном не за счет прямых, а за счет отраженных звуковых волн (большое акустическое отношение).

При этом стереосигналы соответствующим образом задерживаются относительно пространственных сигналов для того, чтобы компенсировать разность пути прямой звуковой волны к местам

расположения микрофонов, воспринимающих пространственную информацию. Пространственный сигнал подмешивается в оба канала как синфазно, так и противофазно. Как показали исследования американского акустика Шредера, при этом достигается наилучшее впечатление пространственности. Получаемая таким образом комплексная программа подается на выход.

При воспроизведении такой программы по обычной двухканальной стереофонической системе для еще большего усиления эффекта присутствия слушателя в акустической атмосфере первичного помещения из комплексной программы вычитается стереосигнал. Таким образом, на стороне прослушивания вновь образуется пространственная информация.

Эта пространственная информация с уменьшенным относительно стереосигнала уровнем и после соответствующей частотной коррекции излучается одним или несколькими дополнительными громкоговорителями, размещенными на стенах или потолке помещения.

Эту систему звукопередачи осуществить значительно сложнее, чем стереопередачу, но эффект присутствия, испытываемый слушателем при таком звуковоспроизведении, не оставляет никаких сомнений в будущем стерео-амбиофонии.

ОГЛАВЛЕНИЕ